



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

ANTTI UIMONEN
BETONIRAKENTEISTEN SEINÄELEMENTTIEN VAAKASAUMAN
MITOITUS- JA SUUNNITTELUOHJE

Diplomityö

Tarkastaja: professori Mikko Malaska

TIIVISTELMÄ

ANTTI UIMONEN: Betonirakenteisten seinäelementtien vaakasauman mitoitus- ja suunnitteluohje

Tampereen teknillinen yliopisto

Diplomityö, 62 sivua, 14 liitesivua

Huhtikuu 2018

Rakennustekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Rakennesuunnittelu

Tarkastaja: professori Mikko Malaska

Avainsanat: jäykistävä väliseinäelementti, vaakasauma, Eurokoodi, mitoitusohje

Diplomityössä paneuduttiin jäykistävien väliseinäelementtien vaakasauman toimintaan ja mitoitukseen. Tutkimuksen tavoitteena oli tutkia pystykuormien merkitystä vaakasauman leikkausrasituksiin sekä luoda mitoitus- ja suunnitteluohje seinäelementtien vaakasauman suunnitteluun. Työn yhteydessä haettiin myös uusia liitosratkaisuja seinäelementtien vaakasaumaan. Työssä myös tarkasteltiin eroja yksinkertaisen käsinlaskennan ja FEM-laskennan välillä sekä eri tekijöiden vaikutusta vaakasauman rasitusjakaumiin.

Työn alkuosassa haettiin tietoa kirjallisuudesta rakennuksen jäykistämisestä sekä jäykistävien väliseinäelementtien vaakasauman mitoituksesta ja toiminnasta. Vaakasauman toiminnan tarkastelussa paneuduttiin leikkauskiteeteoriaan. Samassa yhteydessä esiteltiin kaksi vaihtoehtoista vaakasauman liitostyyppiä, joita ei ole ollut käytössä Suomessa.

Tutkimuksen laskentaosassa tarkasteltiin kahta laskentatapausta. Laskenta tehtiin yksinkertaisilla käsinlaskentamenetelmillä sekä Dlubalin RFEM-ohjelmalla. Ensimmäinen laskentatapausta oli yksinkertainen kolmen leikkausseinän käsittävä jäykistysysteemi, jonka tietyt voimasuureet laskettiin. Toisessa laskentatapauksessa tutkittiin siirtopalkin päällä olevaa jäykistävää seinärakennetta ja mitoitettiin rakenteesta poimitun mallielementin liitokset. Toisesta laskentatapauksesta tehtiin myös kolme vertailumallia, joiden avulla saatiin selvitettyä eri tekijöiden merkitys vaakasaumojen voimajakaumissa.

Lukuun 5 kerättiin vaakasauman mitoituksen pääperiaatteet. Siinä myös käytiin perusteellisesti läpi mallielementin liitoksien mitoitus ja mitoituksessa huomioitavat asiat. Viimeisessä yhteenvedossa käytiin läpi laskentatapauksista saadut tulokset. Huomattiin, että pystykuormilla on suuri vaikutus vaakasauman leikkausrasituksiin. Myös eri tekijöiden vaikutukset rasitusjakaumiin saatiin eriteltyä. Samalla todettiin käsinlaskentamenetelmien huono soveltuvuus monimutkaisempiin rakenteisiin. Työssä huomattiin myös kitkan suuri merkitys liitoksen toiminnassa ja mitoituksessa sekä sen tuomat riskit.

Pohdinta osuudessa käytiin läpi leikkausvoimien piikkien ja seinäkenkäliitoksen merkitystä leikkausmitoitukseen. Pohdinnassa heräsi myös ajatus vaarnatappiliitoksen siirtymän vaikutuksesta kokonaissiirtymiin. Vaarnatappiliitos vaatii siirtymän, jota ei tavallisesti kokonaissiirtymiä tarkasteltaessa oteta huomioon. Työn lopussa ehdotettiin uudeksi vaakasaumaratkaisuksi lukitusliitostyyppistä liitosta, jossa vaakasauman leikkausrasitukset saataisiin siirrettyä konsolin tavoin. Tätä liitosta tulisi kuitenkin vielä tutkia tarkemmin ja mahdollisesti vielä muuttaa ennen sen käyttöön ottamista.

ABSTRACT

ANTTI UIMONEN: Design of horizontal joints between precast concrete shear walls

Tampere University of Technology

Master of Science Thesis, 62 pages, 14 Appendix pages

April 2018

Master's Degree Programme in Civil Engineering

Major: Structural Engineering

Examiner: Professor Mikko Malaska

Keywords: precast shear wall, horizontal joint, Eurocode, design guideline

This thesis considers the function and design of horizontal joints between precast shear walls. The goal was to study the effect of vertical loads in horizontal joint's shear force distribution and to create a design guideline for the horizontal joint. Also there was an aim to find new types of connections for precast shear walls. Furthermore the study examines the differences between calculations by hand and FEM-calculations. Also the impact of certain factors on the stress distribution of the horizontal joint was examined.

At the beginning part of the thesis, information was gathered from the literature about structural systems and the function and designing of horizontal joints between precast shear walls. Shear-friction theory was introduced. In the same context two types of horizontal connections which are not in use in Finland were presented.

There were two calculation cases in the calculation part of the study. The calculations were done by simple methods by hand and with Dlubal's RFEM-software. The first case was a simple three-shear wall structural system from which the calculations of the stresses were done. In the second case there was a shear wall-transfer beam structure. A single wall unit was selected and its connections were designed. Also three different models were modified from the original shear wall-transfer beam structure to study the effects of different factors in the stress distribution of the horizontal joint.

The basic principles of design a horizontal joint of a shear wall structure is presented in chapter 5. Moreover the dimensioning of the example wall's joints and the matters considering the design were examined thoroughly. At the final summary the results from the calculations were explained. It was noticed that vertical loads have a significant effect on the shear stress in the horizontal joint. Also the impacts of the different factors on the stress distributions were analyzed. It was stated that simple calculations made by hand are unsure when the structure in question is complex. The thesis concluded that friction has a major role in horizontal joint and that there are risks when friction is used in design.

At the discussion chapter there were speculation about shear force peaks and wall shoe connection's effect on shear capacity. It was also noted that the short dowel connection requires a displacement which should be considered when calculating the entire transition of the wall structure. Usually it isn't considered. At the end of the thesis a new type of horizontal connection was suggested. This connection would act much like a concrete corbel. However this connection should be examined more and possibly modified before it could be put to use.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Ramboll Finland Oy:lle. Työn tarkastajana on toiminut Tampereen teknillisen yliopiston professori Mikko Malaska.

Suuret kiitokset Rambollin ohjaajilleni Joona Tuikalle sekä Matti Piriselle. Heidän osallistuminen useisiin palavereihin ja keskusteluihin auttoi ratkaisevasti työni etenemisessä. Kiitos myös Mikko Malaskalle työni ohjaamisesta.

Haluan kiittää myös ystäviäni, jotka olen saanut opiskeluaikanani yliopistossa. Raksajattujen tiiviistä yhteistyöstä on ollut suuri apu opiskeluissani.

Suurimmat kiitokset työstäni kuuluvat avopuolisolleni Vilmalle, joka on ollut tukenani ja auttanut minua jaksamaan.

Espoossa, 23.04.2018

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
1.1	Tutkimuksen tausta ja motivaatio.....	2
1.2	Tutkimusongelman kuvaus	3
1.3	Tutkimuksen tehtävä ja tavoite.....	4
2.	KORKEAN RAKENNUKSEN JÄYKISTÄMINEN	6
2.1	Jäykistämisperiaatteet	6
2.1.1	Leikkausseinät	7
2.1.2	Tornijäykistys	8
2.2	Jäykistysuunnittelu ja –mitoitus.....	9
2.3	Voimien jakautuminen.....	12
3.	VAAKALIITOKSEN TOIMINTA JÄYKISTÄVÄSSÄ SEINÄSSÄ JA MITOITUS.....	14
3.1	Leikkausvoiman kuormansiirtomekanismit seinäelementtien välisessä vaakasaumassa.....	14
3.1.1	Kitka.....	16
3.1.2	Adheesio, koheesio ja mekaaninen lukitusilmiö	17
3.1.3	Vaarnavaikutus	18
3.2	Vaakaliitoksen mitoitus	19
3.2.1	Eurokoodin mukainen mitoitus.....	20
3.2.2	Vaarnatappiliitoksen mitoitus.....	21
3.2.3	Lyhyen vaarnatappiliitoksen mitoitus.....	22
3.3	Jäykistävän seinäelementin vaihtoehtoisia vaakaliitosratkaisuja	23
4.	VOIMASUUREIDEN LASKENTA VAAKASAUMASSA.....	26
4.1	FEM-laskenta	27
4.2	Käsinlaskenta.....	29
4.3	Toisen kertaluvun vaikutukset.....	30
4.4	RAKENNUKSEN JÄYKISTÄVIEN SEINIEN VAAKASAUMOJEN VOIMASUUREET	31
4.4.1	Voimien jakaantuminen jäykistäville rakenteille	31
4.4.2	Kuormat.....	32
4.4.3	Voimasuureiden käsinlaskenta	32
4.4.4	Vertailu.....	34
4.4.5	Kitka.....	35
4.4.6	Yhteenveto.....	36
4.5	JÄYKISTÄVÄN SEINÄN VAAKASAUMOJEN VOIMASUUREET JA MITOITUS.....	36
4.5.1	Kuormat.....	38
4.5.2	Voimasuureiden käsinlaskennan tulokset	38
4.5.3	Vertailu.....	39
4.5.4	Kitka.....	42

4.5.5	Elementin V13 saumojen mitoitus.....	43
4.5.6	Laskentamallien vertailu	46
4.5.7	Yhteenveto.....	51
5.	SEINÄELEMENTTIEN VAAKASAUMAN MITOITUSOHJE	53
5.1	Mallielementin liitosten mitoitus.....	54
6.	YHTEENVETO.....	58
6.1	Pohdinta	59
6.2	Jatkotutkimustarpeet.....	59
	LÄHTEET	61

LIITE A: ESIMERKKILASKELMA 8-KERROKSISETA TOIMISTOTALOSTA

LIITE B: MALLIKOHTEN RASITUSTEN KÄSINLASKENTA

LIITE C: ELEMENTIN V1 3 LASKELMAT

LIITE D: SAUMOJEN LIITOSDETALJIT

KUVALUETTELO

<i>Kuva 1.</i>	<i>Esimerkkirakenne, jossa jäykistykseen on käytetty leikkausseinä ja jäykistystornia (BES 2010)</i>	<i>2</i>
<i>Kuva 2.</i>	<i>Pilareilla tuetun siirtopalkin päälle asennettu jäykistävä seinä.....</i>	<i>3</i>
<i>Kuva 3.</i>	<i>Muodonmuutokset esimerkkitaipauksessa</i>	<i>4</i>
<i>Kuva 4.</i>	<i>Mallielementti ja siihen liittyvät liitososat</i>	<i>5</i>
<i>Kuva 5.</i>	<i>Leikkausseinän toimintamalli (Elliot & Jolly 2013)</i>	<i>8</i>
<i>Kuva 6.</i>	<i>Leikkausvoimien jakautuminen jäykistystornissa (Leskelä 2008)</i>	<i>9</i>
<i>Kuva 7.</i>	<i>Jäykistysuunnittelun tehtäviä (Mäkinen 2016).....</i>	<i>10</i>
<i>Kuva 8.</i>	<i>Voimien jakautumisen laskennassa tarvittavat mitat</i>	<i>13</i>
<i>Kuva 9.</i>	<i>Leikkauskitkateoriaa havainnollistava sahalaita malli (Santos & Julio 2009)</i>	<i>15</i>
<i>Kuva 10.</i>	<i>Leikkausvoiman kolme siirtomekanismia siirtymän funktiona (Santos & Júlio 2012)</i>	<i>16</i>
<i>Kuva 11.</i>	<i>Kitkavoiman muodostuminen (ME Mechanical Team 2017)</i>	<i>17</i>
<i>Kuva 12.</i>	<i>Adheesio ja mekaaninen lukitusilmiö (Randl 2013)</i>	<i>18</i>
<i>Kuva 13.</i>	<i>Raudoituksen vaarnavaikutus (Paulay, Park & Phillips 1974).....</i>	<i>19</i>
<i>Kuva 14.</i>	<i>Eurokoodin mukainen vaarnattu työsauma (SFS-EN 1992-1-1 :2015)</i>	<i>21</i>
<i>Kuva 15.</i>	<i>Vaarnavaikutuksen yleinen kestävyysmalli (Leskelä 2008)</i>	<i>22</i>
<i>Kuva 16.</i>	<i>Lyhyen vaarnatapin minimietäisyydet (Leskelä 2008).....</i>	<i>23</i>
<i>Kuva 17.</i>	<i>Elementtirakenteisten leikkausseinien välinen liitos (The 2016 Code)</i>	<i>24</i>
<i>Kuva 18.</i>	<i>Elementtirakenteisten leikkausseinien välinen liitos (The 2016 Code)</i>	<i>25</i>
<i>Kuva 19.</i>	<i>Ensimmäisen laskentatapauksen FEM-rakennemalli</i>	<i>28</i>
<i>Kuva 20.</i>	<i>Toisen laskentatapauksen FEM-rakennemalli</i>	<i>28</i>
<i>Kuva 21.</i>	<i>Normaalijännitys jakauman periaate (BES 2010).....</i>	<i>29</i>
<i>Kuva 22.</i>	<i>Jäykistävien seinien sijainti tasossa.....</i>	<i>31</i>
<i>Kuva 23.</i>	<i>Seinä 1</i>	<i>33</i>
<i>Kuva 24.</i>	<i>Seinän 1 leikkausvoimajakauma elementin V-3 alareunassa</i>	<i>34</i>
<i>Kuva 25.</i>	<i>Seinän 1 normaalivoimajakauma elementin V-3 alareunassa</i>	<i>35</i>
<i>Kuva 26.</i>	<i>Tutkittava rakenne, kuvassa 3 alinta kerrosta</i>	<i>37</i>
<i>Kuva 27.</i>	<i>Leikkausvoimajakauma tasolla H1</i>	<i>39</i>
<i>Kuva 28.</i>	<i>Elementin V11 leikkausvoimajakauma tasolla H1</i>	<i>40</i>
<i>Kuva 29.</i>	<i>Elementin V14 leikkausvoimajakauma tasolla H1</i>	<i>40</i>
<i>Kuva 30.</i>	<i>Normaalivoimajakauma tasolla H1</i>	<i>41</i>
<i>Kuva 31.</i>	<i>Elementin V11 normaalivoimajakauma</i>	<i>41</i>
<i>Kuva 32.</i>	<i>Elementin V14 normaalivoimajakauma</i>	<i>42</i>
<i>Kuva 33.</i>	<i>Elementin V13 leikkausvoimajakauma tasolla H1</i>	<i>43</i>
<i>Kuva 34.</i>	<i>Elementin V13 leikkausvoimajakauma tasolla H2</i>	<i>44</i>

Kuva 35.	<i>Elementin V13 normaalivoimajakauma tasolla H1</i>	44
Kuva 36.	<i>Elementin V13 normaalivoimajakauma tasolla H2</i>	45
Kuva 37.	<i>Elementin V13 vasemman pystysauman leikkausvoimajakauma</i>	45
Kuva 38.	<i>Elementin V13 oikean pystysauman leikkausvoimajakauma</i>	46
Kuva 39.	<i>Elementin V13 oikean pystysauman normaalivoimajakauma</i>	46
Kuva 40.	<i>Laskentamallit</i>	47
Kuva 41.	<i>Leikkausvoimajakaumien vertailu tasolla H1</i>	48
Kuva 42.	<i>Pääjännitykset alkuperäisessä tapauksessa</i>	49
Kuva 43.	<i>Normaalivoimajakaumien vertailu tasolla H1</i>	50
Kuva 44.	<i>Elementti V13</i>	54
Kuva 45.	<i>Vaakaliitosehdotus</i>	60

TAULUKKOLUETTELO

<i>Taulukko 1.</i>	<i>Jäykistyssysteemien soveltuvuus (Taranath 2010).....</i>	<i>11</i>
<i>Taulukko 2.</i>	<i>Pinnan karheudesta riippuvat kertoimet (SFS-EN 1992-1-1 :2015)</i>	<i>20</i>
<i>Taulukko 3.</i>	<i>Voimien jakaantuminen seinille.....</i>	<i>32</i>
<i>Taulukko 4.</i>	<i>Seinän I vetotarkastelu.</i>	<i>33</i>
<i>Taulukko 5.</i>	<i>Leikkausvoimien jakaantumisen vertailu</i>	<i>34</i>
<i>Taulukko 6.</i>	<i>Kitkan vaikutus.....</i>	<i>36</i>
<i>Taulukko 7.</i>	<i>Seinän vetotarkastelu</i>	<i>38</i>
<i>Taulukko 8.</i>	<i>Tasojen leikkaus- ja puristusvoimaresultantit.....</i>	<i>38</i>
<i>Taulukko 9.</i>	<i>Leikkausvoimaresultantit tasolla H1.....</i>	<i>39</i>
<i>Taulukko 10.</i>	<i>Kitkan vaikutus.....</i>	<i>42</i>
<i>Taulukko 11.</i>	<i>Lyhyiden vaarnatappiliitosten mitoitus</i>	<i>55</i>
<i>Taulukko 12.</i>	<i>Pystysaumojen mitoitus</i>	<i>56</i>
<i>Taulukko 13.</i>	<i>Pulttiliitosten mitoitus</i>	<i>57</i>

MERKINNÄT

FEM	Finite Element Method, elementtimenetelmä
\cdot_s	Raudoituksen poikkipinta-ala
$F_{V,B}$	Rakennekokonaisuuden nurjahduskuorma
$F_{V,BB}$	Rakennekokonaisuuden nimellinen nurjahduskuorma
$F_{V,BS}$	Nurjahduskuorma, jossa mukana vain leikkausvoiman vaikutukset
$F_{V,Ed}$	Pystysuuntainen kokonaiskuorma
H_n	Rakenteelle välittyvä voima
I_n	Rakenteen jäyhyysmomentti
I_z	Jäyhyysmomentti
$V_{sd,Rd}$	Leikkauskestävyys
a_n	Etäisyys kiertokeskiöstä jäykistysosan keskiöön
e_v	Voiman etäisyys leikkaustasosta
f_{cd}	Betonin puristuslujuuden mitoitusarvo
$f_{ck,cube}$	Betonin kuutiopuristuslujuuden ominaisarvo
f_{ck}	Betonin puristuslujuuden ominaisarvo
f_{ctd}	Betonin vetolujuuden mitoitusarvo
f_{yd}	Raudoituksen vetolujuuden mitoitusarvo
f_{yk}	Raudoituksen vetolujuuden ominaisarvo
v_{Rdi}	Leikkauskestävyys
x_i	Jäykkyyskeskipisteen etäisyys origosta
γ_v	Liitoksen osavarmuusluku
σ_n	Raudoituksen normaalijännitys
σ_{sd}	Raudoituksen normaalijännitys
τ_{xy}	Leikkausjännitys
\emptyset	Raudoituksen halkaisija
ζ	Raudoituksen jännityksestä riippuva kerroin
H	Kokonaisvoima
Q	Staattinenmomentti
V	Leikkausvoima
X	Koordinaatti
b	Poikkileikkauksen leveys
c	Pinnan laadusta riippuva kerroin
e	Epäkeskisyyys
v	Lujuuden pienennyskerroin
α	Raudoituksen kulma
ε	Epäkeskisyydestä riippuva kerroin
μ	Kitkakerroin
ρ	Raudoituksen suhteellinen pinta-ala

1. JOHDANTO

Jokaisessa rakennuksessa on jonkinlainen jäykistysjärjestelmä. Jäykistysjärjestelmän päätehtävä on siirtää rakennukseen kohdistuvat vaakasuuntaiset kuormat perustuksien kautta maapohjaan. Maallikon termein voisi sanoa, että jäykistysysteemi estää rakennusta sortumasta ja kaatumasta.

Vaakakuormitukset siirretään jäykistäville rakenteille vaakarakenteilla, kuten esimerkiksi ontelolaatastojen avulla. Suomessa korkeissa rakennuksissa käytetään yleisesti jäykistävinä osina seiniä ja kuiluja. Niiden kautta vaakakuormat saadaan siirrettyä perustuksille ja maapohjaan asti.

Elementtirakenteisissa rakennuksissa jäykistys on usein vaativa suunnittelutehtävä. Betonielementtien välisten liitosten toiminta on tärkeää rakennekokonaisuuden kannalta, koska koko rakennusrungon toiminta on riippuvainen liitosten toiminnasta. Toimivien liitosten ansiosta rakenne toimii monoliittisesti yhtenäisenä kokonaisuutena. Jos elementtien välistä liitosta ei pystytä suunnittelemaan toimivaksi, on siirryttävä paikalla valettaisiin rakenteisiin tai keksittävä jotain muuta.

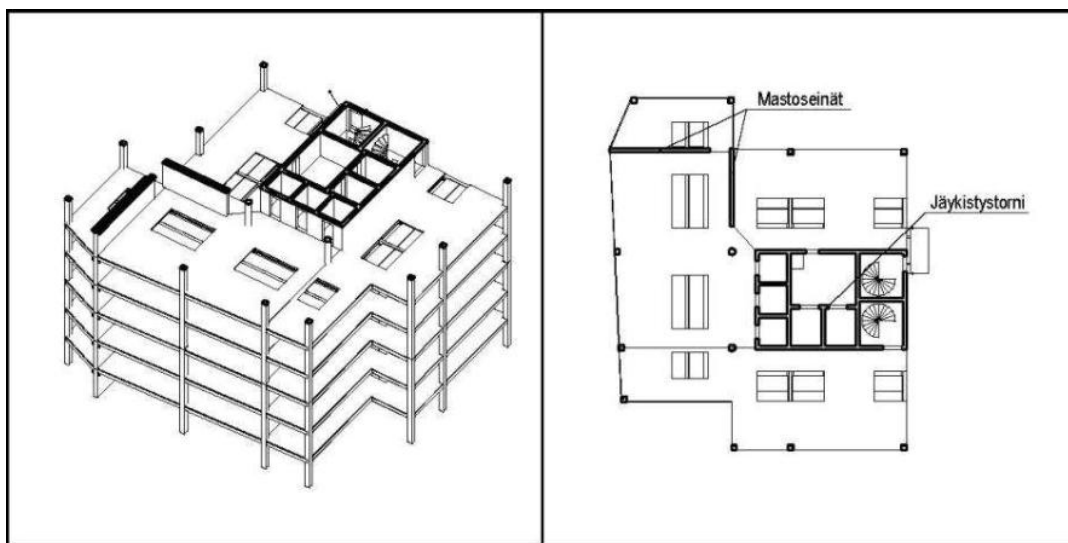
Liitosten haastavan detaljoinnin lisäksi elementtirakenteiden käyttöä korkeissa rakennuksissa rajoittaa suuret kuormat. Kun pystykuormaa on paljon, on elementeistä tehtävä paksumpia, jotta kuormankantokapasiteettia ei ylitetä. Silloin myös niiden paino suhteessa leveyteen kasvaa. Elementeistä on tehtävä kapeampia, jotta ne on mahdollista nostaa. Tällöin elementtien sekä liitosten määrä kasvaa, eikä elementtirakenteiden käyttö ole välttämättä enää taloudellisesti kannattavaa.

Tämä diplomityö on osa Rambollilla käynnissä olevaa betonielementtien mitoituksen yhtenäistämiprojektia. Diplomityössä tarkastellaan elementtirakenteisen jäykistävän seinän vaakasaumaa ja sen mitoitusta. Tarkastelu tehdään havainnollistavien laskentatapaus-ten avulla. Diplomityöstä on rajattu pois tuulen dynaamisten vaikutusten tarkastelu ja keskitytään enemmän liitosten voimasuureisiin.

Suomessa elementtirakentaminen, eli valmisosarakentaminen on noussut rakentamisen peruskulmakiveksi 1970-luvulta lähtien. Kehitystä on tapahtunut useissa osa-alueissa, mutta jossain osa-alueissa on jämähdetty paikalleen. Esimerkkinä tähän sopii vaakasauman lyhyet vaarnatapid, jotka siirtävät leikkausvoimia elementiltä toiselle. Niiden käyttö on vakiintunut eikä muita vaihtoehtoja ole juurikaan käytössä.

1.1 Tutkimuksen tausta ja motivaatio

Diplomityössä tutkitaan jäykistäviä väliseinäelementtejä sekä niiden välisiä liitoksia. Jäykistävät rakenteet siirtävät vaakakuormat perustuksille. Vaakakuormia ovat esimerkiksi maanpaine, tuulikuorma ja lisävaakavoima. Lisävaakavoimalla huomioidaan rakenteiden mahdollinen vinous ja se otetaan analyysissä huomioon muiden kuormien kanssa. Esimerkiksi toimistotaloissa, on hyvin yleistä, että käytetään hissi- tai porraskuiluja jäykistävinä rakenteina. Kuvassa 1 on esitetty tasoleikkaus seinillä jäykistetystä rakennuksesta, jossa jäykistävinä seinärakenteina ovat mastoseinät ja jäykistystorni.



Kuva 1. Esimerkkirakenne, jossa jäykistykseen on käytetty leikkausseiniä ja jäykistystornia (BES 2010)

Korkea rakentaminen on yleistynyt. Korkeassa rakentamisessa on tyypillistä, että seinäelementtien liitoksissa kulkee suuria voimia. Etenkin alimmissa kerroksissa, joihin vaakakuormat sekä pystykuormat kumuloituvat. Koska alimmissa kerroksissa liitoksissa kulkevat voimat ovat suuria, saattaa liitosten toteutus olla vaikeaa, koska tarvittavien liitososien määrä on suurempi. Tilaa ei välttämättä ole tarpeeksi tavallisesti käytetyille liitososille ja joudutaan poikkeamaan tavallisista liitoksista.

Seinäelementtien vaakasaumoissa käytetään tyypillisesti lyhyitä vaarnatappeja siirtämään leikkausvoimia. Oikeastaan muuta vakiintunutta tapaa siirtää leikkausvoimat seinäelementtien vaakasaumassa ei ole. Vaarnatapeilla ei kuitenkaan aina saada aikaan riittävää leikkauskestävyyttä. Vaarnatappien leikkauskestävyyden lisäksi voidaan liitoksen leikkauskapasiteettiin lisätä kitkan osuus liitoksen leikkauskapasiteettiin.

Korkeissa ja monimuotoisissa rakennuksissa rasiusten laskennassa käytetään yleensä apuna FEM-ohjelmia. FEM-laskennalla saadaan tarkkoja tuloksia, joihin ei yksinkertaisilla käsinlaskentamenetelmillä välttämättä päästä. FEM-laskennassakin piilee omat

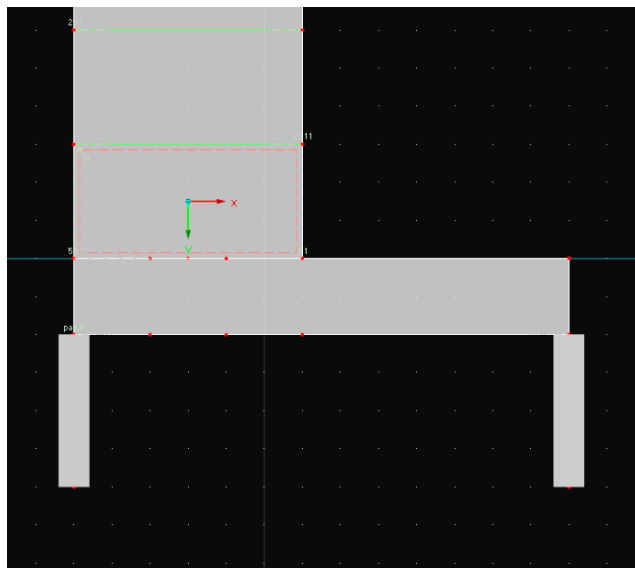
haasteensa. Esimerkiksi tulosten lukemisessa voi olla ongelmia, jos rasiuskäyrät näyttävät monimutkaisilta. Yksinkertaisia käsinlaskumenetelmiä voidaan käyttää tulosten suuruusluokan tarkistamiseen, kuitenkin aina se ei ole mahdollista.

Diplomityön aihe on tärkeä, koska liitosten toiminta määrittää elementtirakenteissa koko rakenteen toimintaa. Siksi olisi tärkeää ymmärtää miten esimerkiksi vaakaliitos oikeasti toimii. Myös liitoksen mitoittavien voimien määrittäminen täytyy hallita varsinaisen mitoituksen onnistumiseksi. Tässä työssä pyritään ohjeistamaan vaakasauman liitoksen oikeaoppinen mitoitus.

1.2 Tutkimusongelman kuvaus

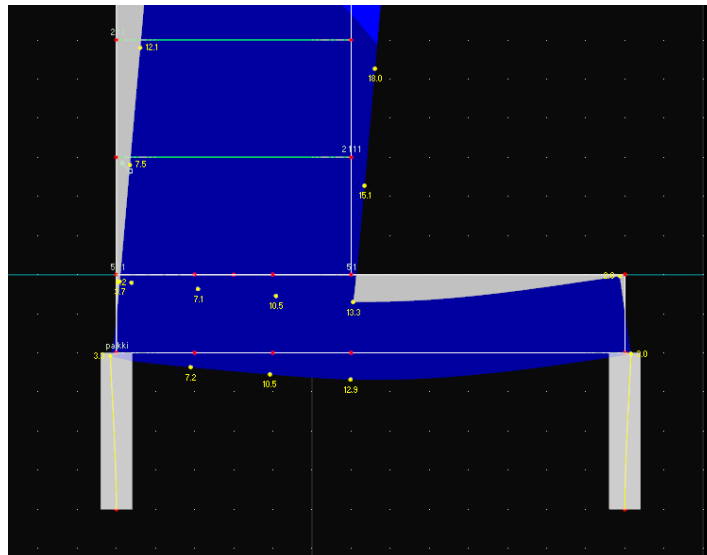
Yksi tarkasteltava asia jäykistävien väliseinäelementtien vaakasuuntaisten saumojen mitoituksessa on kuormitustietojen luotettavuus. Saumojen kuormitukset saadaan yleensä helposti luettua valmiista FEM-mallista. Saatujen tulosten luotettavuutta lisätään tarkastuslaskennan avulla, joka tehdään usein yksinkertaisesti käsin. Kun rasiukset haetaan FEM-mallista ja tarkastuslaskenta tehdään yksinkertaisilla käsinlaskentamenetelmillä, syntyy usein eroavaisuuksia. Monimutkaisissa malleissa erot saattavat olla suuria. Eroja voi syntyä esimerkiksi silloin, kun pystykuormista aiheutuu saumoihin vaakakomponentteja, joita on vaikea laskea käsin.

Pystykuormasta aiheutuvat vaakakomponentit saumassa voivat johtua esimerkiksi alustan joustavuudesta. Kuvassa 2 esitetty FEM-malli on esimerkki tästä tapauksesta. Kuvassa jäykistävä seinärakenne on asennettu kahdelle pilarille tuetun korkean siirtopalkin päälle.



Kuva 2. Pilareilla tuetun siirtopalkin päälle asennettu jäykistävä seinä

Kuvan 2 palkki taipuu hieman kun sitä kuormitetaan pystysuunnassa. Palkin yläpinta puristuu pystykuorman aiheuttamasta momentista, jolloin myös seinään syntyy jännityksiä. Tällöin pystykuormat aiheuttavat leikkausvoimia vaakasaumoihin, vaikka ulkoisia vaakasuuntaisia voimia ei ole. Kuvassa 3 on hahmoteltu tätä ilmiötä.



Kuva 3. Muodonmuutokset esimerkkitapauksessa

Keskeinen asia vaakasauman tarkasteluissa on myös sauman siirtymät. Koska liitokset eivät ole jäykkiä vaan sitkeitä, pääsee siirtymiä tapahtumaan. Sauman läpi kulkeva raudoitus alkaa siirtämään leikkausvoimaa vasta kun siirtymää on tapahtunut. Siirtymät toisaalta vaikuttavat leikkausvoimien jakaantumiseen. Sauman eri kuormansiirtomekanismeille on tyypillistä, että ne alkavat vaikuttamaan vaakasuuntaisen siirtymän eri arvoilla. Leikkausvoiman kuormansiirtomekanismit on käyty läpi luvussa 3.1.

Sauman täydellinen ja todellisuutta vastaava mallintaminen FEM-malliin on siten haastavaa, koska vaakasuuntaista siirtymää vastustava voima ei ole vakio eri siirtymän arvoilla. FEM-laskennassa tavallisesti seinärakenteet on mallinnettu monoliittisina kuorielementteinä, ja liitoksen rasitukset luetaan rakenteesta sauman todellisesta kohdasta.

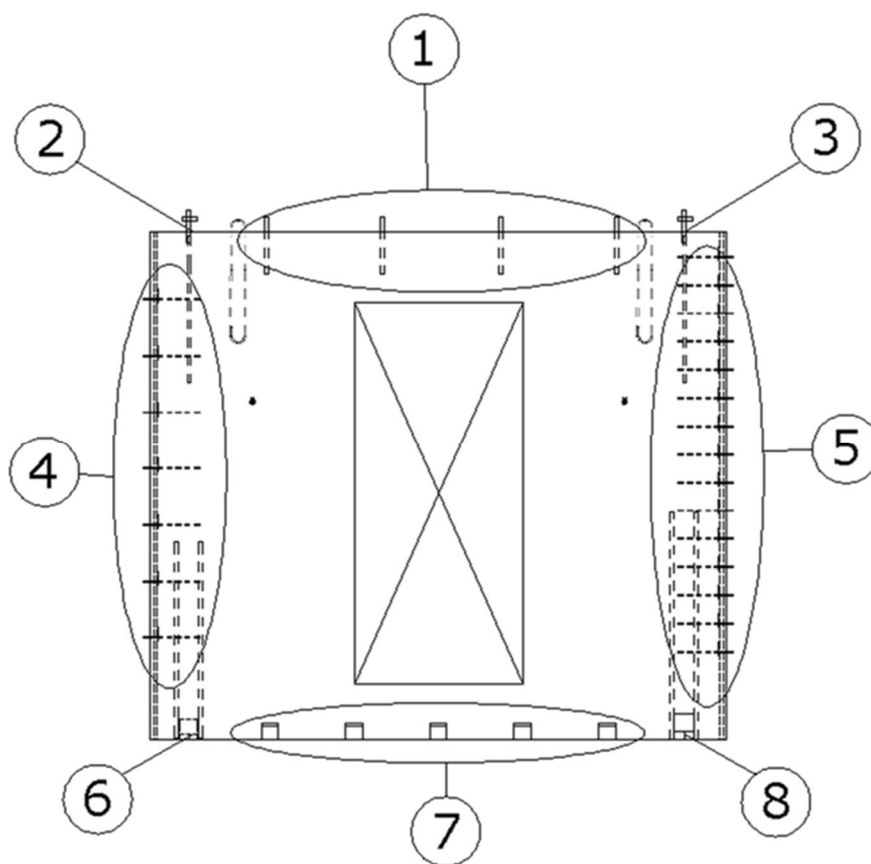
1.3 Tutkimuksen tehtävä ja tavoite

Diplomityössä tutkitaan eroja käsinlaskennan ja FEM-laskennan välillä. Laskentaosuudessa tutkitaan tapausta, jossa yksinkertaisella käsinlaskennalla ei välttämättä enää saada aikaan luotettavia tuloksia, vaan joudutaan käyttämään FEM-ohjelmia. Laskentaosuudesta on rajattu pois kiertymien ja siirtymien laskenta. Työssä keskitytään erityisesti vaakasaumojen leikkaus- sekä normaalijännityksiin.

Diplomityössä esitellään kaksi laskentatapausta, joista ensimmäisessä tarkastellaan rakennuksen jäykistävien seinien voimasuureita. Toinen tapaus on sovellettu laskentatapaus eräästä toteutetusta kohteesta. Toteutetun kohteen tutkittava rakenne esitellään,

minkä jälkeen verrataan käsinlaskennasta ja FEM-laskennasta saatuja tuloksia. Rakenteesta tehdään kolme vertailumallia, joista jokainen on muunnelma alkuperäisestä rakenteesta. Vertailumalleista tehdään FEM-mallit ja verrataan tuloksia toisiinsa sekä pohditaan eri tekijöiden vaikutusta. Laskentaosuudessa tuodaan esiin pystyvoimien vaikutus vaakasauman leikkausvoimajakaumaan.

Diplomityön tavoitteena on luoda kattava ohje jäykistävien väliseinäelementtien vaakasauman mitoittamiseen. Työssä käydään läpi vaakasauman mitoitus oikeaksi katsotuilla tavoilla ja esitetään haastavia tilanteita saumojen mitoittamiseen liittyen. Ohjeessa käydään läpi askel askeleelta mallielementin saumojen mitoitus. Mallielementin saumojen liitososien mitoittamiseen on otettu mukaan myös pystysaumot, koska niiden mitoituksessa on paljon samaa. Mallielementti ja sen liitososat ovat esitetty kuvassa 4. Mallielementissä käytetyt liitososat ovat: 1) lyhyet vaarnatapit, 2) pultti, 3) pultti, 4) teräslenkit ja betonivaarnat, 5) teräslenkit ja betonivaarnat, 6) seinäkenkä, 7) varauskolot vaarnatapeille, 8) seinäkenkä.



Kuva 4. Mallielementti ja siihen liittyvät liitososat

Työn laskentaosuudessa tehdään varsinainen mitoitus mallielementin liitososille. Mitoitukset tehdään yhden kuormitustapauksen perusteella. Luvussa 5 käydään läpi saadut tulokset ja kuinka niihin päädyttiin.

2. KORKEAN RAKENNUKSEN JÄYKISTÄMINEN

Huolimatta rakennuksen korkeudesta ja jäykistämistavasta, on rakennuksen jäykistämisessä huomioitava aina kaksi perusvaatimusta. Ensimmäisen mukaan vaakasuuntaisten voimien siirtäminen on varmistettava ilman suuria muodonmuutoksia. Toisen vaatimuksen mukaan jäykistävien pystyrakenteiden on pystyttävä säilyttämään stabiliteettinsa. (Leskelä 2008)

Korkeiden rakennusten jäykistykseen suunnittelulle ominaista on tuulikuorman ja sen dynaamisten vaikutusten tarkastelu. Suunnittelussa otetaan huomioon rakennuksen värähtelyt ja niihin liittyvien hitausvoimien tuoma rasitus. Värähtelyitä tarkastellaan myös käyttäjien kokemien kiihtyvyyksien suhteen. Tyypillinen taipumarajan täytyminen ei aina välttämättä riitä, jotta kiihtyvyydet olisivat sallituissa rajoissa. (Kiviluoma 2007)

Vaakavoimien siirtämiseen suunniteltuja jäykistyssysteemejä on käytössä useita. Teräsbetoniset jäykistyssysteemit voidaan useimmiten jakaa kolmeen perustyyppiin, jotka ovat leikkausseinät, kehäjäykistys ja niiden yhdistelmä. Lisäksi voidaan käyttää teräsrakenteisia ristikoita. Jäykistyssysteemin valinta ei ole yksinkertainen suunnittelijan tekemä päätös, vaan sen valintaan vaikuttaa useita tekijöitä. Usein tärkeimpänä tekijänä ovat rakennuksen arkkitehtoniset ratkaisut. Suurta painoarvoa on myös rakennuksen korkeudella, muotosuhteilla, käyttötarkoituksella sekä kuormituksen suuruudella. (Taranath 2010)

2.1 Jäykistämisperiaatteet

Rakennuksen rungon suunnittelussa on osoitettava sen riittävä stabiilius. Sen lisäksi myös on osoitettava kaikkien kuormien siirtyminen rakenneosasta toiseen. Rakennukseen vaikuttaa ulkoisia kuormia, jotka voidaan jakaa pysty- ja vaakakomponentteihin. Näitä komponentteja rakennuksen eri osat kantavat puristettuina, vedettyinä, taivutettuna, vääntörasitettuna, leikkausrasitettuna ja näiden kaikkien yhdistelminä. Kuormat siirretään näin rakenneosasta toiseen ja lopulta perustusten kautta maapohjaan. (Leskelä 2008)

Rakennuksen jäykistämisessä yksi tärkeimmistä tutkittavista asioista on liitosten toimivuus. Elementtirakenteisen rakennusrungon toiminta on riippuvainen liitosten toimivuudesta, ja sen vuoksi elementtirungon jäykistäminen täytyy suunnitella erikseen. Rakenteen riittävä stabiilius tulee suunnitella myös erikseen rakennusvaiheen aikana. Liitokset on mitoitettava perustuen todelliseen toimintatapaan. Liitokset kytkevät elementit muihin rakenteisiin, siirtävät voimat jäykistysrakenteisiin ja varmistavat valmisosista koostuvan rakenteen toiminnan. (Leskelä 2008)

Taranathin (2010) mukaan korkean rakennuksen tehokkaan jäykistyssysteemin periaatteet ovat olleet tiedossa jo pitkään ja ne ovat:

1. Rakennusta kaatavat voimat vastaanotetaan pystyrakenteilla, jotka pyritään sijoittamaan mahdollisimman kauas rakennuksen geometrisesta keskipisteestä.
2. Jäykistäville pystyrakenteille johdetaan mahdollisimman paljon pystykuormaa, joka vastustaa kaatavia voimia.
3. Pyritään liittämään jäykistävät pystyrakenteet toisiinsa leikkausta kestävillä liitoksilla.
4. Ulkoista vaakasuuntaista kuormaa, kuten tuulta, siirretään rakenneosilla, jotka ovat puristettuja mieluummin kuin vedettyjä.

2.1.1 Leikkausseinät

Jäykistäviä seiniä kutsutaan leikkausseiniksi, koska yleensä suurin osa vaakasuuntaisista leikkausvoimista otetaan vastaan ja siirretään perustuksille niiden avulla. Leikkaus ei kuitenkaan pelkästään hallitse niiden toimintaa. Vaakasuuntaiset kuormat aiheuttavat leikkausvoimia sekä kaatavia voimia seiniin. Tämä saattaa aiheuttaa leikkausseiniin puristuksen lisäksi vetoa. (Taranath 2010)

Jäykistävät seinät ovat jäykistäviä vain, jos ne on suunniteltu leikkauksen tai taivutuksen kestäviksi. Niiden jäykkyys elementin tasossa on suuri. Leikkausseinät ottavat vaakavoimia vastaan maston tavoin, minkä vuoksi niitä kutsutaan myös mastoseiniksi. Suuren jäyhyysmomentin vuoksi mastoseinät ovat hyvin jäykkiä vaakasiirtymien suhteen. (Leskelä 2008)

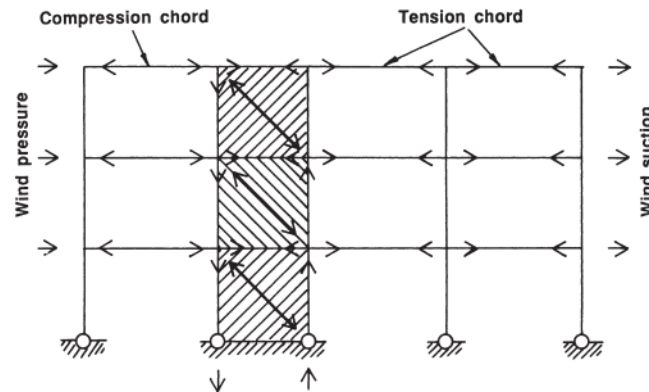
Leikkausseinät ovat käyttökelpoinen, turvallinen ja taloudellinen ratkaisu rakennuksen jäykistämiseen. Niiden rakennemalli voidaan kuvata pystysuorana ulokepalkkina, joka siirtää vaakasuuntaiset voimat muilta rakenteilta perustuksille. Suositeltavaa on, että leikkausseiniä olisi vähintään kaksi jokaista rakennuksen pääakselia kohti. Leikkausseinät suunnitellaan pystykuormia kantaviksi, sillä se lisää seinän vastustuskykyä kaatumista ja sauman aukeamista vastaan. (PCI 2004)

PCI design handbook -teoksessa (PCI 2004) mainitaan, että vaakasuuntaisten voimien jakaantuminen jokaiselle erilliselle leikkausseinälle riippuu seuraavista tekijöistä:

1. Perustusten ja maaperän ominaisuudet
2. Välipohjan jäykkyys
3. Leikkausseinien ja niiden liitosten taivutus- ja leikkausjäykkyys.
4. Vaakakuormien epäkeskisyys suhteessa leikkausseinien jäykkyyskeskiöön

Jäykistykseen suunnittelussa on tavallista, että välipohja ja yläpohja toimivat tasoissaan jäykkinä rakenteina. Myös perustusten ja maaperän muodonmuutokset jätetään usein huomiotta. Tällöin kuormat jakautuvat leikkausseinille niiden jäykkyyksien suhteessa. (PCI 2004)

Kuvassa 5 on esitetty havainnollistava rakennekuva leikkausseinällä jäykistetystä systeemistä. Kuvaan on merkitty myös ulkoiset kuormat sekä kuormien kulkureitit.



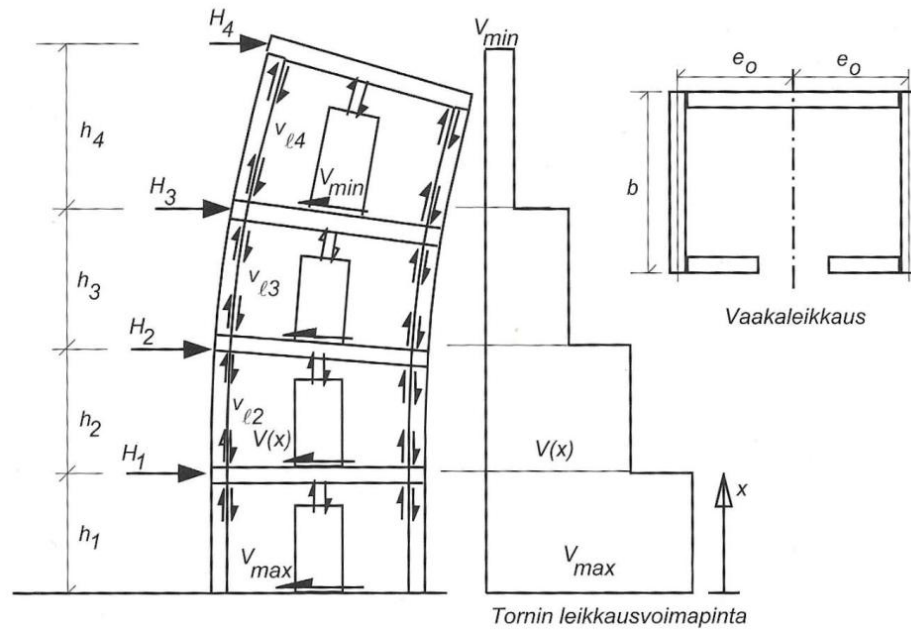
Kuva 5. Leikkausseinän toimintamalli (Elliot & Jolly 2013)

Kuvan 5 systeemissä pilarit eivät toimi jäykistävinä rakenneosina, vaan kantavat ainoastaan pystykuormia. Välipohjat ja yläpohja siirtävät vaakasuunnassa voimia leikkausseinille, jotka välittävät ne perustuksille.

2.1.2 Tornijäykistys

Jäykistävät tornirakenteet toimivat samalla tavalla kuin leikkausseinät, eli perustuksiin jäykästi tuettuina ulokkeina. Tärkeää jäykistystornin mitoituksessa on, että eri seinien väliset liittymät mitoitetaan niissä vaikuttavalle leikkausvoimalle. Näin tornirakenne toimii monoliittisesti ja sen jäykkyys on moninkertainen verrattuna tilanteeseen, jossa seinät toimisivat yksittäisinä mastoseininä. Jäykistystornit sopivat erinomaisesti korkeisiin rakennuksiin, koska suuren jäykkyytensä ansiosta ne rajoittavat vaakasuuntaisia vaakasiirtymiä tehokkaasti. (BES 2010)

Tornijäykisteinä toimivat luonnollisesti hissi- ja porraskuilut. Kuvassa 6 on esitetty tyyppillinen jäykistystornina toimiva hissikuilu ja sen liitoksiin syntyvät leikkausvoimat.

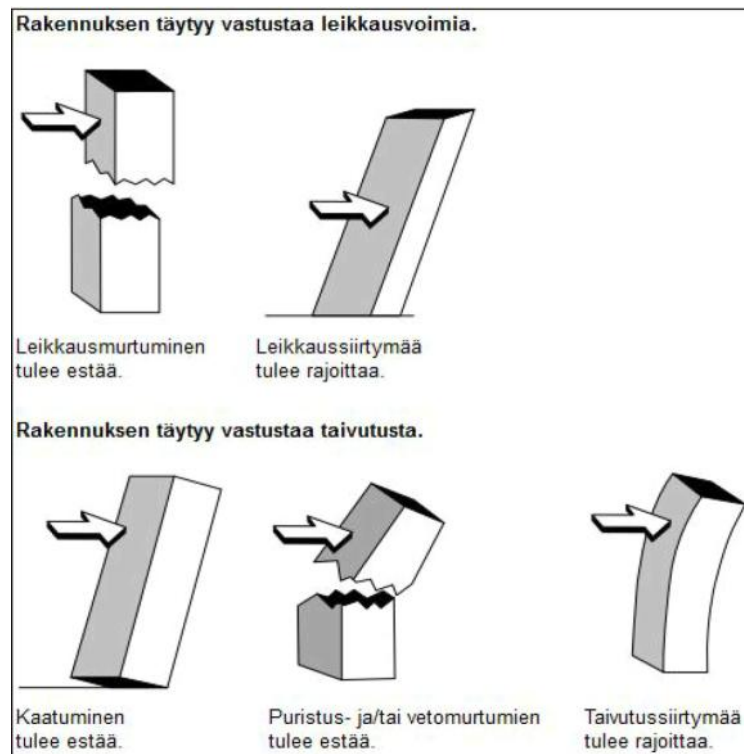


Kuva 6. Leikkausvoimien jakautuminen jäykistystornissa (Leskelä 2008)

Jäykistäviksi rakenteiksi on varsinkin toimistotaloissa helppo valita hissi- ja porraskuilut, koska ne kuuluvat joka tapauksessa rakennukseen. Tällöin jäykistämisestä ei aiheudu myöskään lisäkustannuksia. Porras- ja hisskuiluille saadaan myös johdettua pystykuormia tehokkaasti, mikä on tässä tapauksessa suotuisaa. Lisäksi, kun vaakavoimat siirretään kuiluilla, voidaan pilarikokoja pienentää. Liitoksissa rasitukset kuitenkin kasvavat, jolloin erityistä huomiota täytyy kiinnittää liitosten suunnitteluun jäykistäävissä rakenteissa. (Leskelä 2008)

2.2 Jäykistys suunnittelu ja -mitoitus

Yleisesti jäykistys suunnittelun tehtävänä on määrittää rakennukseen kohdistuvat vaakakuormat ja hallita niiden vaikutukset. Jäykistävien rakenteiden mitoituksessa tulee tarkastella useita eri asioita. Kuvassa 7 on esitelty havainnollistavien kuvien avulla ne pääasiat, joita jäykistys suunnittelulla pyritään rajoittamaan tai estämään.



Kuva 7. Jäykistys suunnittelun tehtäviä (Mäkinen 2016)

Kuvan 7 tehtävien lisäksi on tärkeää, että jäykistys on suunniteltu ja mitoitettu toimivan myös asennustilanteessa. Mahdolliset väliaikaiset tuennat on esitettävä suunnitelmissa. Asennusjärjestys on laadittava, jotta saadaan hallittua asennustilanteen kuormitukset. (BES 2010)















Jäykistys suunnittelun työkaluna voidaan käyttää yleisiä FEM-ohjelmistoja. Niitä käyttäessä on selvítettävä mitä oletuksia ohjelmistot käyttävät. Esimerkiksi leikkausmuodonmuutosten huomiointi korkeissa mastoseinissä on tärkeää, sekä toisen kertaluvun vaikutusten huomiointi. Mahdollinen rakenteiden halkeilu on myös otettava tarvittaessa huomioon rakenteiden jäykkyyksissä. Jotta FEM-laskennan tulokset saadaan vastaamaan todellisuutta, ovat rakenteiden väliset liittymät ja niiden ominaisuudet mallinnettava todellisuutta vastaaviksi. (BES 2010)

Rakennuksen jäykistys suunnittelu tulee aloittaa mahdollisimman aikaisessa suunnitteluvaiheessa. Jäykistysjärjestelmät -ohjeen (BES 2010) mukaan alustavassa jäykistystarkastelussa tulisi tarkastella ainakin seuraavia asioita:

- Rakennuksen riittävä jäykkyys
- Jäykistysjärjestelmän symmetrisyys
- Kiertymän syntyminen ja sen vaikutukset
- Liikuntasaumat ja niiden vaikutus jäykistysjärjestelmään
- Vetovoimien syntyminen ja sitä kautta ankkuroinnin tarve

Eri jäykistyssysteemien käyttökelpoisuus riippuu vahvasti rakennuksen korkeudesta. Taulukossa 1 on esitetty erilaisten jäykistyssysteemien tehokas soveltuvuus erikorkuisille rakennuksille.

Taulukko 1. Jäykistyssysteemien soveltuvuus (Taranath 2010)

Structural systems for concrete buildings															
No.	System	Number of stories												Ultra-tall buildings	
		0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120–200 stories	
1	Flat slab and columns														
2	Flat slab and shear walls														
3	Flat slab, shear walls and columns														
4	Coupled shear walls and beams														
5	Rigid frame														
6	Widely spaced perimeter tube														
7	Rigid frame with haunch girders														
8	Core supported structures														
9	Shear wall—frame														
10	Shear wall—Haunch girder frame														
11	Closely spaced perimeter tube														
12	Perimeter tube and interior core walls														
13	Exterior diagonal tube														
14	Modular tubes, and spine wall systems with outrigger and belt walls														

Taulukosta 1 nähdään, että leikkausseinät ainoina pystysuuntaisina jäykistysosina soveltuvat käytettäväksi 20-30 kerroksisiin rakennuksiin asti. Korkeammilla rakennuksilla leikkausseinä käytetään yhdistelmäjäykistyksessä yhdessä muiden jäykistystapojen kanssa.

Jäykistysjärjestelmät mitoitetaan murtorajatilassa SFS-EN 1990 ja SFS-EN 1992 mukaisesti. Murtorajatilassa tarkastellaan jäykistysrakenteissa seuraavat asiat:

- Jäykän kappaleen tai sen osan tasapaino
- Siirtymätilojen pysyminen raja-arvoissa
- Rakenteen tai sen osan stabiilius sekä mekanismiksi muuttuminen
- Ajasta riippuvat ilmiöt, esimerkiksi väsyminen
- Rakennuksen staattinen tasapaino

Jäykistysjärjestelmä mitoitetaan käyttörajatilassa edellä mainittujen standardien mukaisesti. Käyttörajatilat liittyvät ihmisten mukavuuteen, rakennuksen ulkonäköön ja rakenteiden toimintaan normaalissa käytössä. Kriteerejä käyttörajatilan tarkasteluihin ovat siirtymät, värähtelyt sekä vauriot, jotka vaikuttavat epäsuotuisasti ulkonäköön, käyttäjiin tai rakenteen kelpoisuuteen. Käyttörajatilassa rajoitetaan jännityksiä, halkeamaleveyksiä sekä taipumia. (BES 2010)

Jäykistysjärjestelmä mitoitetaan lisäksi onnettomuusrajatilassa. Rakenteet mitoitetaan onnettomuusrajatilassa niin, että etenevää vaurioitumista tai jatkuvaa sortumaa ei pääse

tapahtumaan. Jatkuvan sortuman estämiseen käytetään sidejärjestelmää, jolla voidaan siirtää kuorma toista reittiä, jos rakenteeseen tulee paikallinen vaurio. Jäykistyssysteemin on siis pidettävä yllä rakennuksen stabiilius osittaisen sortuman tapauksessa. Tavalliset onnettomuustilanteet ovat tulipalo, räjähdys sekä ajoneuvon törmäys. (BES 2010)

2.3 Voimien jakautuminen

Ulkoiset vaakakuormat välittyvät jäykistäville rakenteille niiden jäykkyyksien suhteessa. Toisin sanoen, jäykistysosan jäykkyys määrittelee sille välittyvän voiman ja sitä vastaavan siirtymätilan (Leskelä 2008). Leskelän (2008) mukaan vaakakuormien jakaantuminen eri jäykistysrakenteiden kesken riippuu seuraavista tekijöistä:

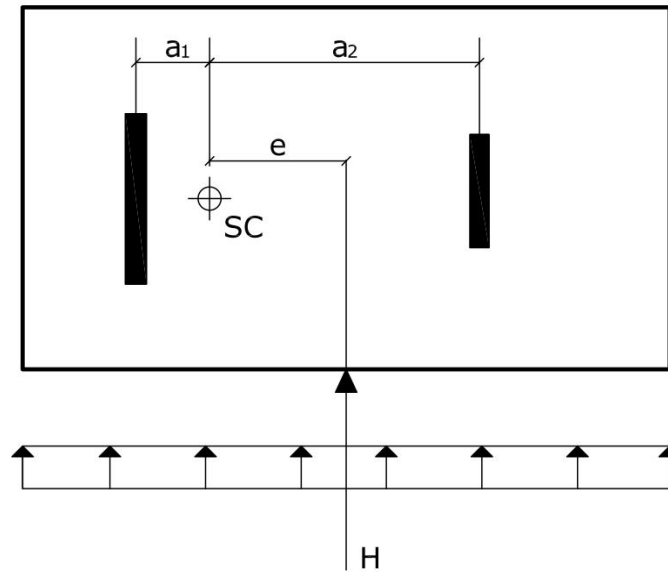
1. Jäykistysrakenteen siirtymäjäykkyys:
2. Jäykistysrakenteen sijainti
3. Pilareiden sijainti tasossa
4. Seinien välisen liitokset tai seinän ja perustusten välinen liitos
5. Väli- tai yläpohjatasen liikuntasaumot.

Jos jäykistävien seinien kimmokertoimet voidaan olettaa samoiksi ja välipohjat ovat ta-
soissaan jäykkiä rakenteita, voidaan voimien jakautuminen seinille laskea Leskelän (2008) mukaan seuraavalla kaavalla:

$$\frac{H_n}{H} = \frac{I_n}{\sum I_i} \pm \frac{e I_n a_n}{\sum I_i a_i^2}, \quad (1)$$

jossa H_n on seinän kantama voima, H kokonaisvaakavoima, I_n on seinän jäyhyysmomentti, $\sum I_i$ kaikkien seinien jäyhyysmomenttien summa, e on kokonaisvaakavoiman epäkeskisyys suhteessa systeemin jäykkyyskeskipisteeseen, a_n on etäisyys systeemin kiertokeskiöstä jäykistysosan n keskiöön. Kuvassa 8 on esitelty havainnollistava esimerkki eri etäisyyksien määrittämisestä jäykistyssysteemeissä.

Kaavan 1 ensimmäinen osuus kuvaa levykentän translaation osuutta ja toinen sen rotaation osuutta. Jos tarkasteltava jäykistysosa on sijoitettu systeemin jäykkyyskeskipisteen vastakkaiselle puolelle, kuin missä vaakakuorman resultantin katsotaan vaikuttavan, on jälkimmäisen termin etumerkki positiivinen. Jos taas jäykistysosa on sijoitettu systeemin jäykkyyskeskipisteen suhteen samalle puolelle, kuin vaakakuormien resultantti, on etumerkki negatiivinen. (Leskelä 2008)



Kuva 8. Voimien jakautumisen laskennassa tarvittavat mitat

Kuvassa 8 SC tarkoittaa jäykistysosien jäykkyysskeskipistettä. Systemin jäykkyysskeskipiste valitun origon suhteen lasketaan kaavasta 2.

$$X = \frac{\sum I_i x_i}{\sum I_i}, \quad (2)$$

jossa x_i on yhden seinän jäykkyysskeskipisteen etäisyys origosta.

Jos jäykistysosan poikkileikkaus on muodoltaan muu kuin suorakaide, kuten T- tai U-poikkileikkaus, lasketaan jäyhyysmomentti kyseessä olevan muodon mukaisesti. Oletuksena on, että levyosat liittyvät kiinteästi toisiinsa ja siirtävät pystysuoria leikkausvoimia. Tällaisen jäykistysosan kiertokeskiönä käytetään vääntökeskiötä. Poikkileikkauksen vääntökeskiö on piste, jonka kautta kulkeva voima ei aiheuta vääntöä poikkileikkaukseen. (Leskelä 2008)

3. VAAKALIITOKSEN TOIMINTA JÄYKISTÄVÄSSÄ SEINÄSSÄ JA MITOITUS

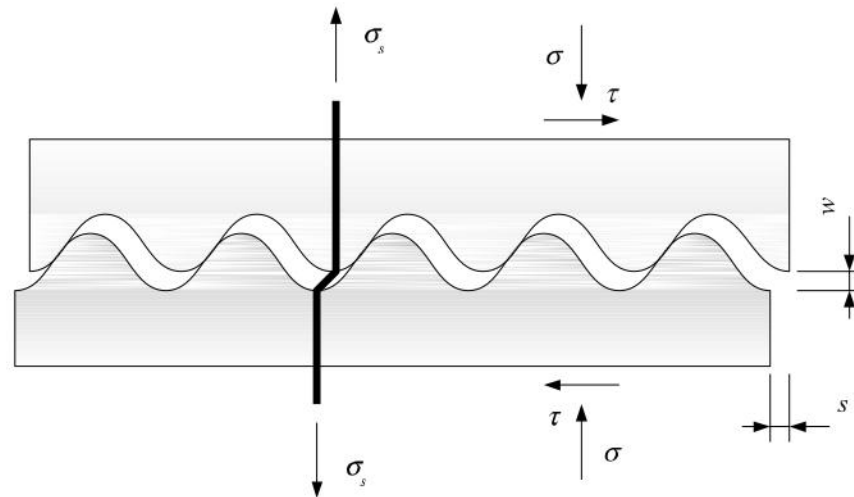
Jäykistävien väliseinäelementtien vaakasaumat mitoitetaan pystyvoimien lisäksi leikkausvoimille, joita vaakarakenteet niille välittävät. Tuulikuorman vaikutuksesta leikkausvoimat kasaantuvat alimpiin kerroksiin niin kuin kuvassa 6, jolloin suurimmille leikkausvoimille altistuvat alimmat kerrokset. Vaakasaumassa saattaa esiintyä puristuksen ja leikkauksen lisäksi myös vetoa. Vetovoimat syntyvät, jos rakenteiden omat painot eivät riitä kumoamaan ulkoisten vaakavoimien aiheuttamia vetojännityksiä vaakasaumoissa. Ulkoiset kuormat aiheuttavat voimia, jotka pyrkivät kaatamaan rakennetta, mikä aiheuttaa elementtien vaakasauman toiselle puolelle vetoa ja toiselle puristusta.

Puristus siirretään betonisaumojen avulla, mutta vetovoimien siirtämiseen elementtien välisessä liitoksessa käytetään erilaisia teräksisiä liittimiä. Teräsosat liitetään toisiinsa hitsaamalla, limittämällä tai pulttaamalla. Liittimien ankkurointikapasiteetti tulee olla aina isompi kuin niiden vetokestävyys (Leskelä 2008).

Elementtien väliset betonisaumat ottavat vastaan puristus- ja leikkausvoimia. Leikkausvoimat voidaan siirtää elementtien liitoksissa tartunnan, kitkan, saumaraudoitukset, vaarauksen tai mekaanisten liitinten avulla. Tartunnan suuruus elementin pinnan ja sauma-betonin välillä riippuu rajapinnan laadusta. Sileällä pinnalla tartunta on huono. Jotta kitka voidaan hyödyntää, tarvitaan liitosta vastaan kohtisuora voima, joka puristaa pintoja yhteen. Raudoituksen avulla voidaan myös luoda kohtisuoravoima liitokseen kitkan muodostamiseksi. Raudoitus toimii myös vaarnaavana (Leskelä 2008).

3.1 Leikkausvoiman kuormansiirtomekanismit seinäelementtien välisessä vaakasaumassa

Kahden betonisen pinnan välistä yhteistoimintaa pituussuuntaisen leikkausjännityksen vaikuttaessa voidaan kuvata leikkauskitkateoriaa (*Shear-friction theory*) käyttäen. Kyseinen menetelmä kehiteltiin jo 1960-luvulla, ja se on käytössä yhä, joskin sitä on kehitelty vuosien saatossa ja kehitellään yhä. Eurokoodin lisäksi kyseisen teorian ovat omaksuneet lukuisat muut suunnittelustandardit. Leikkauskitkateorian mukaan leikkausvoimien siirtämiseen betonipintojen rajapinnassa, jossa vaikuttaa samaan aikaan leikkausvoima ja puristus, osallistuu ainoastaan kitka. Kuvassa 9 on esitetty yksinkertaistettu sahalaita malli (*saw-tooth model*), jossa on esitetty selkeästi leikkauskitkateorian pääperiaatteet. Se ottaa huomioon pinnan läpi kulkevan raudoituksen sekä normaalijännitykset leikkaustasolla. Leikkauskitkateoria voidaan käyttää useissa erilaisissa rakenteissa ja sitä voidaan soveltaa hyvin betonisten seinäelementtien välisiin liitoksiin. (Santos & Julio 2009)



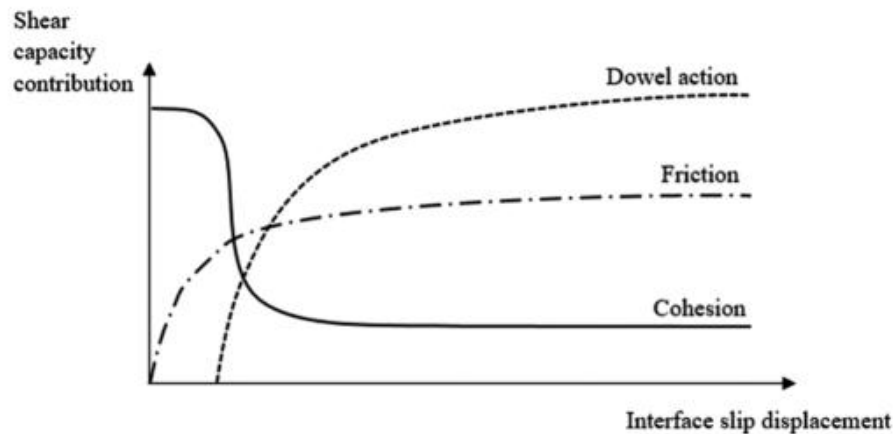
Kuva 9. Leikkauskitkateoriaa havainnollistava sahalaita malli (Santos & Julio 2009)

Leikkausvoima aiheuttaa pintojen välille vaakasiirtymän s . Rajapintaan syntyy myös pystysiirtymä w betonipintojen karheuden aiheuttamasta mekaanisesta lukkiutumisesta (*mechanical interlock*). Siirtymät aiheuttavat vetojännityksiä sauman läpi menevään raudoitukseen, mitkä puolestaan aiheuttavat vastavoimia, jotka pyrkivät puristamaan pintoja yhteen (*clamping force*).

Betonipintojen välistä toimintaa tutkiessa voidaan tutkia kahta tapausta. Ensimmäisessä tapauksessa siirtymää ei ole päässyt juurikaan tapahtumaan ja liitos on adheesion aikaansaama. Tässä tapauksessa leikkauskitkateoria ei ole kelvollinen käytettäväksi. Adhesiivinen sidos syntyy kemiallisten sidosten seurauksena. Kyseinen sidos on jäykkä ja toimii vain, jos syntyvät siirtymät ole suuria. (Randl 2013)

Jo 0,05 mm suuruinen siirtymä voi rikkoa adhesiivisen sidoksen, joka ei palaudu ennalleen. Toisessa tapauksessa siirtymää pintojen välillä on päässyt tapahtumaan sen verran että adhesiivinen sidos on rikkoutunut. Tässä tapauksessa leikkauskitkateoriaa voidaan käyttää. Siinä pintojen välistä toimintaa ohjaa koheesio, kitka ja vaarnavaikutus. (Santos & Júlio 2012)

Kuvassa 10 on esitetty leikkausvoiman siirtomekanismit pintojen välisen vaakasiirtymän funktiona. Pystyakselilta voidaan lukea kyseessä olevan kuormansiirtomekanismin osallistuminen leikkauskapasiteetin muodostumiseen.



Kuva 10. Leikkausvoiman kolme siirtomekanismia siirtymän funktiona (Santos & Júlio 2012)

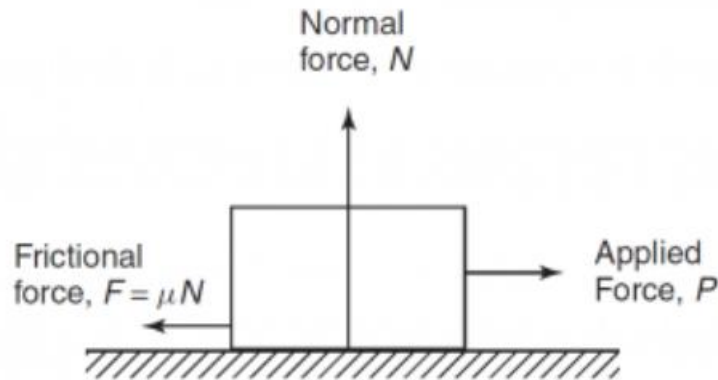
Kahden betonipinnan välisen liitoksen leikkauslujuus voidaan siis muodostaa kuvassa 10 esiintyvien kolmen eri kuormansiirtomekanismin yhdistelmänä. Nämä kuormansiirtomekanismit ovat koheesio, kitka ja vaarnavaikutus.

Jos pintojen välisessä liitoksessa on puristusta, alkavat leikkausvoimat siirtymään kitkan avulla. Kun pintojen välinen vaakasiirtymä kasvaa vielä, alkaa myös raudoitus siirtämään voimia. Raudoitukseen syntyy vetoa aluksi, mikä lisää kitkan vaikutusta rajapinnassa, koska raudoitus vetää pintoja yhteen. Siirtymien kasvaessa raudoitus altistuu myös leikkaukselle ja alkaa siirtämään leikkausvoimia vaarnavaikutuksen kautta (*dowel action*). (Randl 2013)

Tärkeä näkökulma sauman toiminnassa on kuormansiirtomekanismien yhteistoiminta. Eri mekanismien täysi kuormankantokapasiteetti on käytössä erilaisilla siirtymän arvoilla. Kaikki mekanismit ovat yhteydessä toisiinsa ja vaikuttavat toisiinsa. Esimerkiksi veto raudoituksessa vaikuttaa sen taivutuskestävyyteen pienentämällä sitä. Eri mekanismien osallistuminen sauman leikkauslujuuteen riippuu vahvasti pinnan karkeudesta, sidoksen laadusta ja rajapinnan läpi kulkevista liittimistä. Nämä tekijät määrittävät mahdollisten siirtymien muodostumisen. (Randl 2013)

3.1.1 Kitka

Kitkan vaikutus huomioidaan kitkakertoimella, joka kuvaa kahden pinnan välisen kitkan suuruutta. Mitä isompi kitkakerroin on, sitä isompi voima tarvitaan, jotta pinnat liukuvat toisiinsa nähden (ME Mechanical Team 2017). Kuvassa 11 on havainnollistettu kitkan muodostumista tasolla. Kuvan tilanne pätee myös jäykistävien seinäelementtien tapauksessa, kun tarkastellaan kitkan vaikutusta vaakaliitoksessa.



Kuva 11. Kitkavoiman muodostuminen (ME Mechanical Team 2017)

Kitka jakautuu dynaamiseen kitkaan ja staattiseen kitkaan. Dynaaminen kitka on liikekitkaa, joka hidastaa liikettä ja staattinen kitka lepokitkaa, joka pyrkii estämään liikkeen syntymistä. Tavallisesti lepokitkakerroin on pienempi kuin liikekitkakerroin. (ME Mechanical Team 2017)

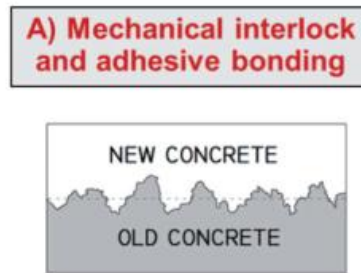
Jos leikkauspinnan läpi kulkee rauditus, syntyy siihen vetoa siirtymän kasvaessa. Kuten aiemmin mainittiin, tämä veto aiheuttaa vastavoiman, joka pyrkii puristamaan pintoja toisiaan vasten. Tämä tarkoittaa sitä, että raudituksella saadaan lisättyä kitkan vaikutusta. (Randl 2013)

Eurokoodi antaa työsauman leikkauskestävyyden tarkasteluissa kitkakertoimeksi arvoja 0,1-0,9 riippuen rajapintojen laadusta. Jaottelu on tarkemmin esitetty luvussa 3.2.1. RIL-115 -julkaisussa on esitetty kahden betonipinnan väliseksi liikekitkakertoimeksi 0,27.

3.1.2 Adheesio, koheesio ja mekaaninen lukitusilmiö

Koheesiolla tarkoitetaan tässä yhteydessä materiaalien välisiä vetovoimia. Koheesio toiminta voidaan jakaa adheesioksi ja mekaaniseksi lukitukseksi (*mechanical interlock*). Adheesio, jota useat tutkijat nimittävät myös partikkeleiden väliseksi koheesioksi, on voima, joka aiheutuu betonipintojen välisestä kemiallisesta sidoksesta. Kun saavutetaan adheesio maksimi leikkauskapasiteetti, kiinnitys irtaana, jonka jälkeen leikkausjännityksiä siirtyy pintojen karheuden aiheuttamasta mekaanisesta lukitusilmiöstä. Leikkauskitkateorian mukaisella koheesiolla painottuu yleensä tähän lukitusilmiöön. (Santos & Júlio 2012)

Kuvassa 12 on havainnollistettu koheesiota, eli adheesio ja edellä mainitun lukitusilmiön tapahtumista. Suurin ero adheesio aikaansaamalla liitoksella verrattuna kitkan ja vaarnavaikutuksen välityksellä toimivaan liitokseen, on se että adheesio aikaansaama liitos on jäykkä. Muut liitosmekanismi ovat sitkeämpiä. (Alkatan 2016).



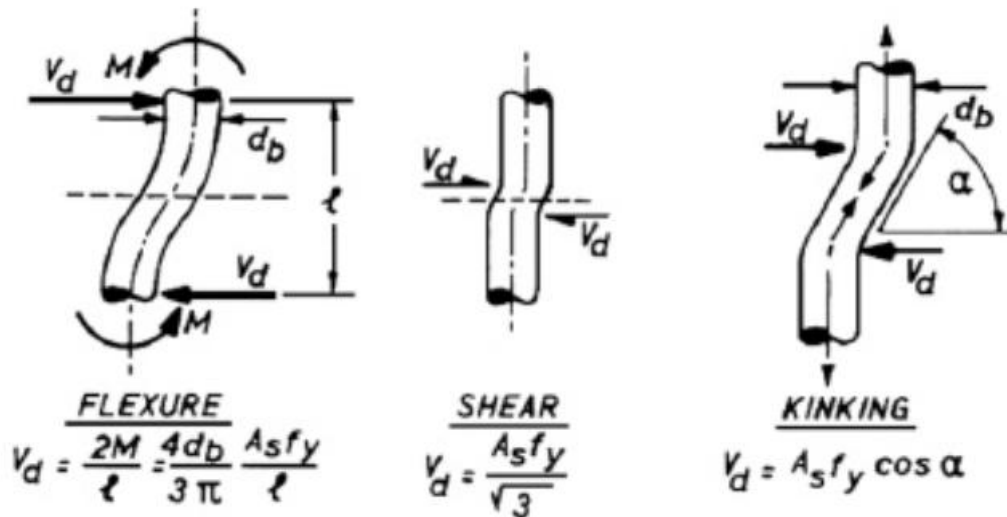
Kuva 12. Adheesio ja mekaaninen lukitusilmiö (Randl 2013)

Adheesio voi vaikuttaa merkittävästi liitoksen leikkauskestävyyteen. Kuitenkin, jos adheesio otetaan mitoituksessa huomioon, on huomioitava myös se, että sidoksen rikkova siirtymän arvo on pieni. Noin 0.05 mm suuruinen siirtymä riittää rikkomaan adheesio liitoksessa. (Randl 2013)

3.1.3 Vaarnavaikutus

Vaarnavaikutus syntyy, leikkauspinnan läpi kulkee terästappi, joka altistuu leikkauspinnan suuntaiselle siirtymälle. Vaarnavaikutusta tutki ensimmäisenä tarkemmin Paulay, Park ja Phillips 1970-luvulla. He tutkivat tapausta, jossa terästappi on kiinni betonissa molemmilla puolilla leikkauspintaa. Heidän mukaan vaarnavaikutus koostuu kolmesta osasta: taivutus (*bending*), leikkautuminen (*shear resistance*) ja niveltymisestä aiheutuva vetovoima (*kinking effect*). (Paulay, Park & Phillips 1974) Nämä kyseiset kolme eri voimansiirtomekanismia on esitetty kuvassa 13.

Niveltyminen muodostaa kestävyydestä isoimman osan ainakin pienikokoisilla teräksillä. Niveltyminen yksin vaatii kuitenkin suurta liittymäpintojen välistä leikkaussiirtymää tai liukumaa. Tällöin täyttä plastista kestävyyttä ei voi käyttää mitoituksessa, koska rakenteen toimivuuden kannalta liian suuri siirtymä on haitallinen. Sen sijaan suunnittelijan näkökulmasta tärkein näistä kolmesta kestävyiden kehittymistavasta on taivutus, joka on useimmissa tapauksissa mitoittava tekijä. (Paulay, Park & Phillips 1974)



Kuva 13. Raudoituksen vaarnavaikutus (Paulay, Park & Phillips 1974)

Tapin taivutuskestävyys on siis tärkein tekijä, kun on kyse raudoituksen välittömästä osallistumisesta leikkausvoimien siirtämiseen. Suurimmat taivutusjännitykset syntyvät liittimeen hieman sauman ylä- ja alapuolelle. Liittimet voivat olla samaan aikaan altistettu vedolle sekä taivutukselle, johtuen sauman aukeamisesta ja leikkausvoimista. Vaarnavaikutusta on siinä tapauksessa redusoitava. Liittimen puhdas leikkautuminen ei ole mitoitettavaa yleensä, koska betoni juurikaan kestä siitä aiheutuvia suuria paikallisia puristuksia ilman että murtumista tapahtuu. Suurin leikkausjännitys esiintyy leikkauspinnan tasossa. Vetovaikutus puolestaan kasvaa koko ajan siirtymän kasvaessa. Suurillakin siirtymillä saatetaan kuormaa voida lisätä vetovaikutuksen ansiosta. Tämä ei kuitenkaan ole kiinnostavaa suunnittelijan näkökulmasta, sillä suuria siirtymiä saumoissa ei voida hyväksyä. (Randl 2013)

3.2 Vaakaliitoksen mitoitus

Vaakaliitoksen tarkoitus on sitoa elementit jäykäksi ja yhtenäiseksi levyrakenteeksi vaakasuunnassa. Jäykistävien väliseinäelementtien mitoituksessa on selvää, että liitoksessa vaikuttaa normaalijännityksien lisäksi myös leikkausjännitykset. Vaakasauman leikkausvoimat voidaan usein siirtää pintojen välisen kitkan avulla, usein kuitenkin saumaan tarvitaan lisäksi myös raudoitusta.

Betoni ei kykene juurikaan siirtämään vetojännityksiä, jolloin tarvitaan teräksisiä liittinosia, jotka pystyvät siirtämään vetojännitykset seinäelementiltä toiselle. Liitoksissa vaikuttava veto siirretään tyypillisesti seinäkenkien ja pulttien avulla. Kyseinen pulttiliitos siirtää kuormia välittömästi asennuksen jälkeen. Liitoksen vetokapasiteetti saadaan valmistajien taulukoista. Useat valmistajat ovat antaneet pulttiliitokselle tällä hetkellä vain vetokestävyyden arvon, minkä takia leikkausvoimien siirtämiseen käytetään muita teräksisiä.

3.2.1 Eurokoodin mukainen mitoitus

Eurokoodissa ei ole seinäelementtien vaakasauman mitoitukseen tarkoitettua ohjetta. Eurokoodista kuitenkin löytyy kaava leikkauskestävyydelle eri aikaan valettujen betonien rajapinnassa, jota voidaan soveltaa seinäelementtien vaakasauman mitoitukseen. Eurokoodin mukainen leikkauskestävyys ottaa huomioon pintojen välisen koheesion ja kitkan. Eurokoodin (SFS-EN 1992-1-1 :2015) mukaan seinäosien välisen työsauman leikkauskestävyys määritellään seuraavasti

$$v_{Rdi} = cf_{ctd} + \mu\sigma_n + \rho f_{yd}(\mu \sin\alpha + \cos\alpha) \leq 0,5v f_{cd}. \quad (3)$$

Kaavan 3 ensimmäinen termi kuvaa koheesion osuutta kestävyudessa, toinen termi kitkan ja viimeinen termi raudoituksen osuutta. Parametrit c ja μ ovat rajapinnan karheudesta riippuvia kertoimia, jotka on esitetty taulukossa 2. Kaavassa f_{ctd} on betonin vetolujuuden mitoitusarvo, f_{cd} betonin puristuslujuuden mitoitusarvo ja f_{yd} raudoituksen lujuuden mitoitusarvo. Kaavassa ρ tarkoittaa raudoituksen suhteellista pinta-alaa ja α kulmaa raudoituksen ja rajapinnan välillä. Normaalijännitys σ_n rajapinnassa on kaavassa positiivinen, jos se on puristusta ja negatiivinen, jos se on vetoa. Puristukselle annetaan myös ehto $\sigma_n < 0,6f_{cd}$. Kun σ_n on vetoa, niin c käytetään arvoa nolla (SFS-EN 1992-1-1 :2015).

Leikkauksesta haljenneen betonin lujuuden pienennyskerroin v saadaan kaavasta 4.

$$v = 0,6(1 - \frac{f_{ck}}{250}) \quad (4)$$

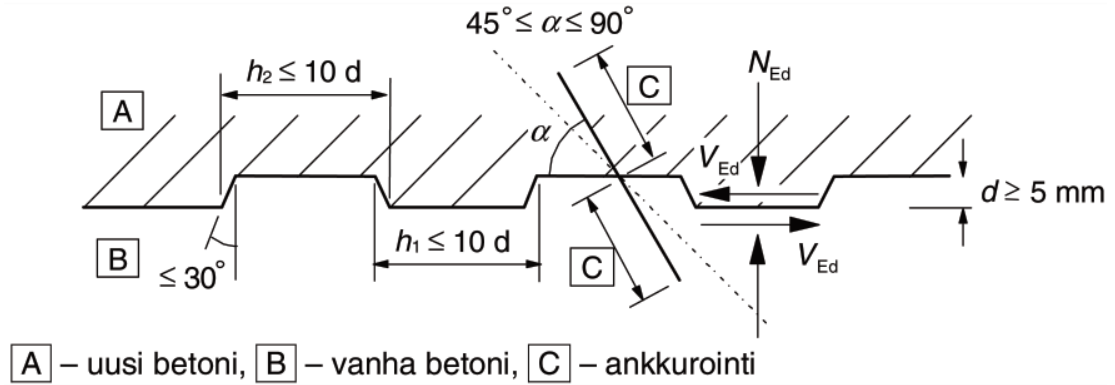
Rajapinnan karheus määrittää koheesion ja kitkan suuruudet leikkauskestävyyden kaavassa. Jos pintojen laadusta ei ole saatavilla tarkempaa tietoa, voidaan pinnat luokitella taulukon 2 mukaisesti ja käyttää siinä annettuja kertoimia.

Taulukko 2. Pinnan karheudesta riippuvat kertoimet (SFS-EN 1992-1-1 :2015)

Pinnan laatu	Esimerkkejä pinnan käsittelystä	c	μ
Hyvin sileä	pinta, joka valettu teräs-, muovi- tai erikoiskäsittelyä puumuottia vasten	0,025-0,1	0,5
Sileä	liukuvalettu pinta tai ekstruuderipinta tai tärytyksen jälkeen jälkikäsittelemättä jätetty vapaa pinta	0,2	0,6
Karhea	pinta, jossa on vähintään 3 mm karheus noin 4 mm välein. Se saavutetaan urituksella, paljastamalla kiviaines tai muilla menetelmillä, joilla saavutetaan vastaava ominaisuus	0,4	0,7
Vaarnattu	pinta, jossa kuvan 14 mukainen hammastus	0,5	0,9

Eurokoodin mukaan seinäosien välisten betonisaumojen leikkauskestävyyden laskennassa, jos sauma voi halkeilla merkittävästi, niin kerroin c on 0 sileillä ja karheilla pin-

noilla ja 0,5 vaarnatuissa saumoissa. Vaarnatun työsauman vaaditut mitat on esitetty kuvassa 14. Lisäksi jos kuormat ovat dynaamisia tai väsyttäviä, on kertoimen c arvot puolitettava.



Kuva 14. Eurokoodin mukainen vaarnattu työsauma (SFS-EN 1992-1-1 :2015)

Vaarnattu sauma on tyypillinen seinäelementtien pystysaumoissa. Sen vuoksi työsauman leikkauskestävyyden kaava (kaava 3) sopii paremmin elementtien pystysaumojen mitoittamiseen.

3.2.2 Vaarnatappiliitoksen mitoitus

Teräsvaarnan leikkauskestävyydelle voidaan käyttää Rasmussenin ja Pruijersin kaavaa:

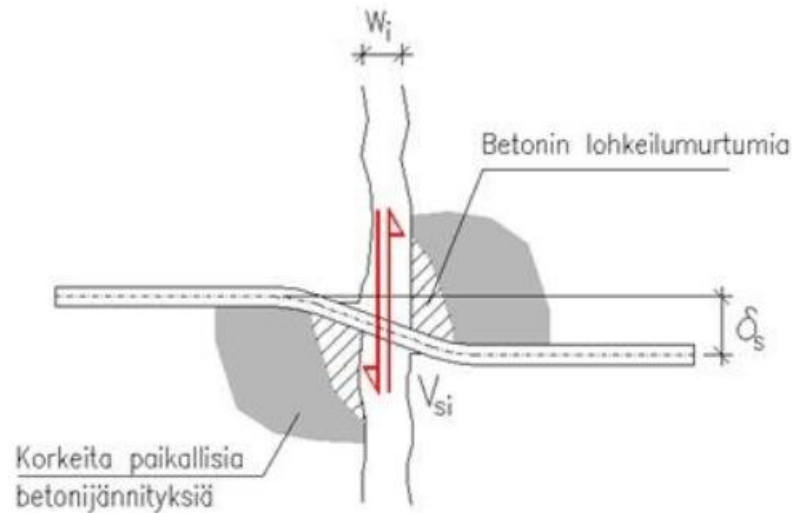
$$V_{sd.Rd} = \frac{1,35}{\gamma_v} (\sqrt{1 + 9\varepsilon^2} - 3\varepsilon) \phi^2 \sqrt{f_{yk} * f_{ck,cube}} \sqrt{1 - \left(\frac{\sigma_{sd}}{f_{yk}}\right)^2}, \quad (5)$$

jossa γ_v on liitoksen osavarmuysluku, ϕ vaarnatapin halkaisija, f_{yk} teräksen ominaislujuus, $f_{ck,cube}$ on betonin ominaiskuutiolujuus ja σ_{sd} on terästangon vetovoimasta syntyvä teräsännitys. Kaavan 5 viimeinen neliöjuuri huomioi vaarnatankoon syntyvän vetojännityksen aiheuttaman pienentävän vaikutuksen vaarnan kestävyteen. Pienennys johtuu siitä, että suurin taivutusmomentti plastisissa nivelissä vähenee tangon vetojännityksen vaikutuksesta. (Leskelä 2008)

Kaavan 5 termi ε lasketaan seuraavasti:

$$\varepsilon = \frac{e_v}{\phi} \sqrt{\frac{f_{ck,cube}}{f_{yk}}}, \quad (6)$$

jossa e_v on puolet sauman paksuudesta. Kuvassa 15 on esitetty vaarnavaikutuksen kestävyys malli. Siinä sauman paksuutta on merkitty termillä w_i .



Kuva 15. Vaarnavaikutuksen yleinen kestävyysmalli (Leskelä 2008)

Kuvan 15 mukainen liitos eroaa tyypillisestä lyhyestä vaarnatappiliitoksesta, koska sen toimintatapa on erilainen ja sen leikkauskapasiteetti on suurempi. Siinä teräs on ankkuroitu molemmiin puolin, jolloin siihen voi syntyä merkityksellisiä vetojännityksiä, jotka vaikuttavat leikkauskapasiteettiin. (Leskelä 2008)

3.2.3 Lyhyen vaarnatappiliitoksen mitoitus

Lyhyitä vaarnatappeja käytetään monissa paikoissa, joiden sijainti rajoittaa syntyvää kestävyttä. Vaarnatappiliitoksen vaarnat ovat lyhyitä terästappeja, jotka eivät synnytä kitkavaikutuksia tai vaarnan vetojännityksiä, joilla olisi merkitystä liitoksen kestävyden kannalta. CEB:n mallinormin mukaan täyden kestävyden tuottamiseen lyhyillä tapeilla toteutettu liitos vaatii siirtymän, joka on suuruudeltaan 10 prosenttia tangon halkaisijasta. (Leskelä 2008)

Eurokoodissa ei ole mainintaa vaarnatappiliitoksen mitoituksesta, mutta mitoitus voidaan Leskelän (2008) mukaan tehdä CEB:n mallinormissa esitetyn Rasmussenin vaarnakaavan pohjalta. Lyhyille vaarnoille saadaan kaavan (7) mukainen leikkauskestävyys.

$$V_{sd.Rd} = \frac{1,3}{\gamma_v} \phi^2 \left(\sqrt{1 + (1,3\varepsilon)^2} - 1,3\varepsilon \right) \sqrt{f_{cd}f_{yd}(1 - \zeta^2)} < \frac{A_s f_{yd}}{\sqrt{3}}, \quad (7)$$

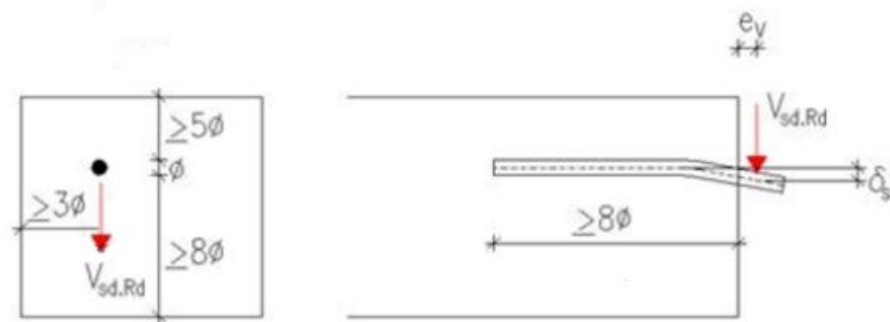
jossa f_{cd} on betonin mitoituspuristuslujuus, f_{yd} teräksen mitoituslujuus ja A_s on vaarnatappien poikkileikkausala. Kaavassa 7 esiintyvä termi ε lasketaan seuraavasti:

$$\varepsilon = 3 \frac{e_v}{\phi} \sqrt{\frac{f_{cd}}{f_{yd}}}, \quad (8)$$

jossa e_v on leikkausvoiman vaikutuspisteen etäisyys betonin pinnasta. Termi ζ lasketaan kaavasta:

$$\zeta = \frac{\sigma_{sd}}{f_{yd}}, \quad (9)$$

jossa σ_{sd} on terästangon vetovoimasta syntyvä teräsännitys. Liitoksen leikkauskestävyys voidaan laskea kaavalla 7, jos täytetään tietyt minimietäisyydet. Kyseiset minimietäisyydet ovat esitetty kuvassa 16.



Kuva 16. Lyhyen vaarnatappin minimietäisyydet (Leskelä 2008)

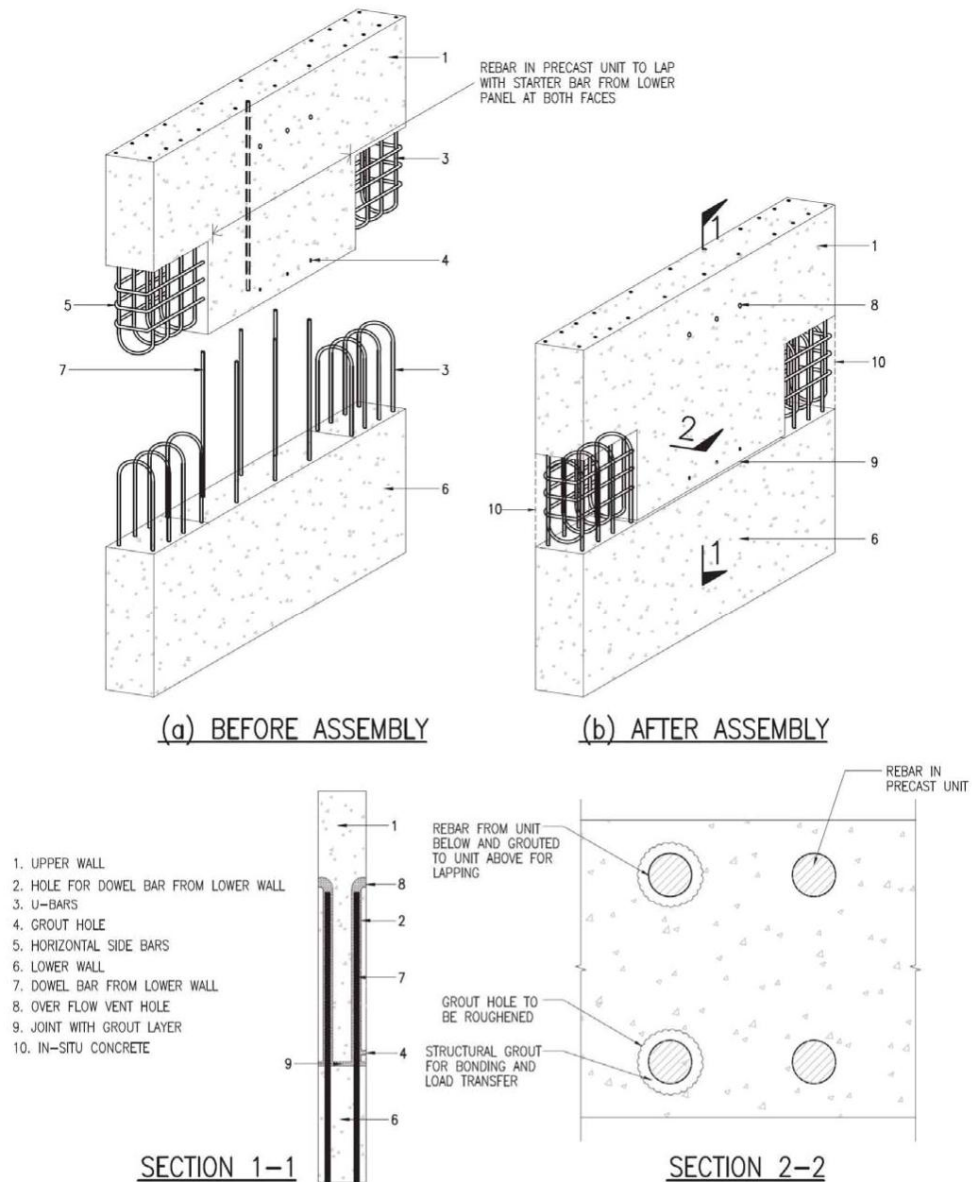
Kun mitoitetaan seinäelementtien välistä vaarnatappiliitosta, kaavaa 7 voidaan supistaa. Koska lyhyitä vaarnatappeja ei tavallisesti suunnitella vedolle ja leikkausvoiman voidaan ajatella vaikuttavan lähellä betonin pintaa, supistuu kaava muotoon:

$$V_{sd,Rd} = \frac{1 \cdot A \phi^2}{\gamma_v} \sqrt{f_{yd} f_{cd}}. \quad (10)$$

Kaavasta 10 saatava leikkauskestävyys on suhteellisen pieni, koska sen vaatima siirtymäkin on pieni. (Leskelä 2008)

3.3 Jäykistävän seinäelementin vaihtoehtoisia vaakaliitosratkaisuja

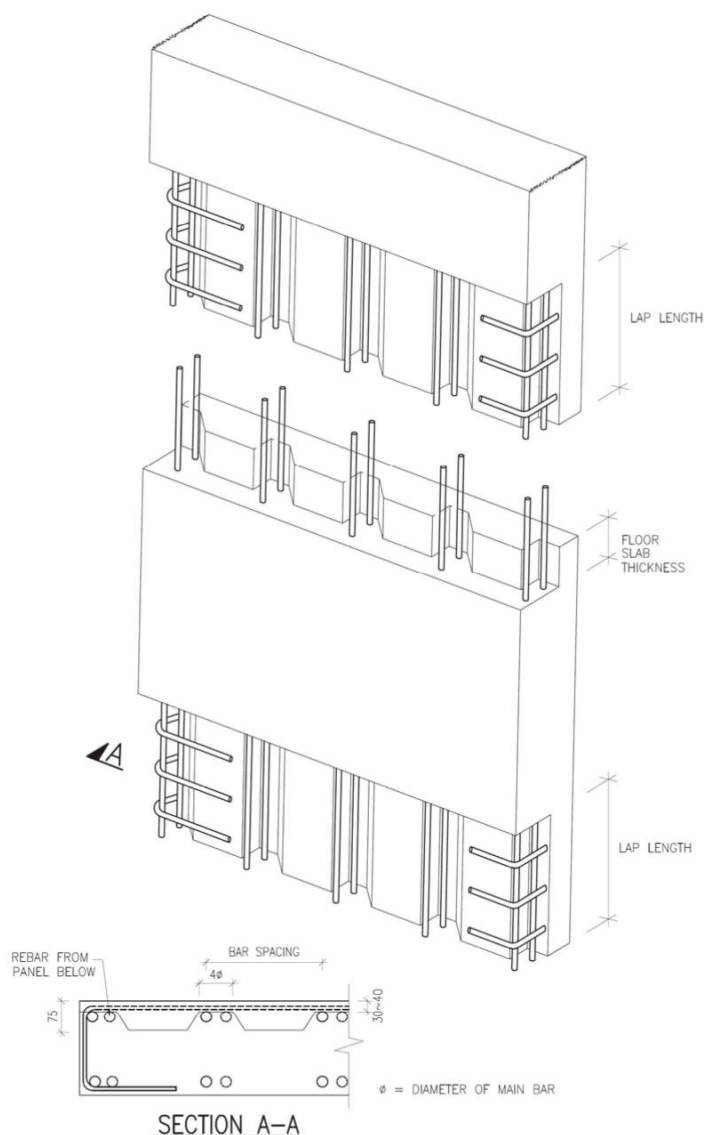
Jäykistävien seinäelementtien vaakasaumoissa käytetään tavallisesti lyhyitä vaarnatappeja sekä seinäkenkiä. Tässä luvussa esitellään kaksi erilaista, vaihtoehtoista vaakaliitosratkaisua. Molempien vaihtoehtojen liitoksia voidaan käyttää jäykistävässä elementtirakenteisissa seinissä. Ensimmäinen vaihtoehtoinen liitos on esitetty kuvassa 17.



Kuva 17. Elementtirakenteisten leikkausseinien välinen liitos (*The 2016 Code*)

Kuvan 17 liitoksen reunoihin valetaan työmaalla raudoitettut konsolimaiset rakenteet, joilla saadaan rajoitettua liitoksen vaakasuuntaista siirtymää. Tällöin reunojen konsolit myös siirtävät leikkausvoimia. Reunojen konsolirakenteet siirtävät myös vetojännityksiä, koska molempien elementtien tangot ankkuroidaan kiinni konsolirakenteeseen. Liitoksen keskellä on alemmassa elementissä kiinni olevia tankoja, jotka juotetaan kiinni ylemppään elementtiin siinä olevien reikävarausten avulla. Alemmasta reiästä pumpataan juotosbetoni niin kauan, että se valuu ylemmästä reiästä. Valmiissa liitoksessa tangot siirtävät sekä vetoa että leikkausta.

Seuraavaksi tarkastellaan toista liitosvaihtoehtoa. Kyseinen liitos on esitetty kuvassa 18.



Kuva 18. Elementtirakenteisten leikkausseinien välinen liitos (The 2016 Code)

Kuvan 18 liitoksessa elementit ovat lovettuja. Elementtien lovettuun osaan valetaan palkki, joka yhdistää rakenteen yhtenäiseksi. Liitoksen etuna on, että ei tarvita seinäkenkiä, koska liitos välittää leikkaus- sekä vetovoimat. Leikkauskapasiteetin mitoituksessa voidaan käyttää Eurokoodin kaavaa työsauman leikkauskestävyydelle (kaava 3).

Molempien liitosten toteutuksen haasteena lienee kuljetettavuus sekä asennettavuus. Terästen tulisi olla kohtuullisella toleranssilla oikeilla paikoillaan, jotta elementit voidaan asentaa oikein. Kuitenkin teräkset saattavat vääntyä helposti kuljetuksessa tai asennuksessa, jolloin liitosten toteutus vaikeutuu. Terästen vääntyminen heikentää myös niiden kapasiteettia. Molempien liitosvaihtoehtojen toteutuksen kannalta on siten tärkeää, että liittyvät teräsosat suojataan, niin etteivät ne pääse vääntymään.

4. VOIMASUUREIDEN LASKENTA VAAKASAUMASSA

Diplomityön laskentaosuus on esitelty tässä kappaleessa. Laskenta tehdään yksinkertaisilla käsinlaskentamenetelmillä sekä Dlubalin RFEM-ohjelmalla. Aluksi esitellään laskennoissa käytetyn FEM-laskennan periaatteet sekä ohjeet mallien tekemiseen. Sitten esitellään rasisutusten käsinlaskennassa käytetyt menetelmät. Laskennoissa ei oteta huomioon toisen kertaluvun vaikutuksia. Eurokoodin mukaan näin voidaan tehdä, jos tietyt ehdot täyttyvät. Nämä ehdot käydään läpi kappaleessa 4.3.

Seuraavaksi käydään läpi kaksi erilaista laskentakokonaisuutta. Ensimmäisessä laskelmassa tarkastellaan tapausta, jossa toimistotalon toisen suunnan jäykisteinä toimivat kolme leikkausseinää. Lasketaan vaakakuormien jakautuminen jäykistysrakenteille sekä yhden seinän elementtien vaakasaumoihin syntyvät rasitukset. Näitä vertaillaan FEM-laskennasta saataviin tuloksiin. Lopuksi tarkastellaan kitkan vaikutusta vaakasauman leikkauskapasiteettiin.

Toisessa laskelmassa tarkastellaan siirtopalkin päällä olevaa jäykistävää seinärakennetta. Laskennassa tarkastellaan elementtien vaakasaumoihin kohtiin syntyviä leikkaus- ja normaalijännitysjakautumia. Työssä myös vertaillaan FEM-laskennan ja käsinlaskennan tuloksia. Seinärakenteesta valitaan yksi mallielementti ja sen liitososat mitoitetaan. Mallielementin mitoitus käydään läpi luvussa 5. Alkuperäisestä laskentatapauksesta tehdään kolme vertailumallia. Eri mallien leikkaus- ja normaalijännitysjakautumia vertaillaan keskenään, jotta saadaan selville eri tekijöiden, kuten aukkojen sekä joustavan siirtopalkin vaikutukset rasitusjakautumiin.

Laskennoissa tarkasteltavia kuormia ovat rakenteiden omasta painosta muodostuvat pysyvät kuormat, tuulikuorma sekä rakenteiden mahdollisen vinouden huomioon ottava lisävaakavoima. Työ on rajattu siten, että tarkastellaan laskennassa vain yhtä kuormitusyhdistelmää, jossa tuuli ja lisävaakavoima vaikuttavat samaan suuntaan.

Tavoitteena on osoittaa mahdollinen pystykuormien vaikutus leikkausvoimajakautumiin. Laskentaosuuden avulla pyritään myös osoittamaan käsinlaskennan soveltuvuutta eri tapauksissa. Ensimmäisessä laskentatapauksessa rakenne on yksinkertainen, jolloin käsinlaskenta todennäköisesti soveltuu hyvin käytettäväksi. Toisessa tapauksessa sen sijaan rakenne on erikoisempi, jolloin yksinkertainen käsinlaskenta saattaa muodostua liian epätarkaksi.

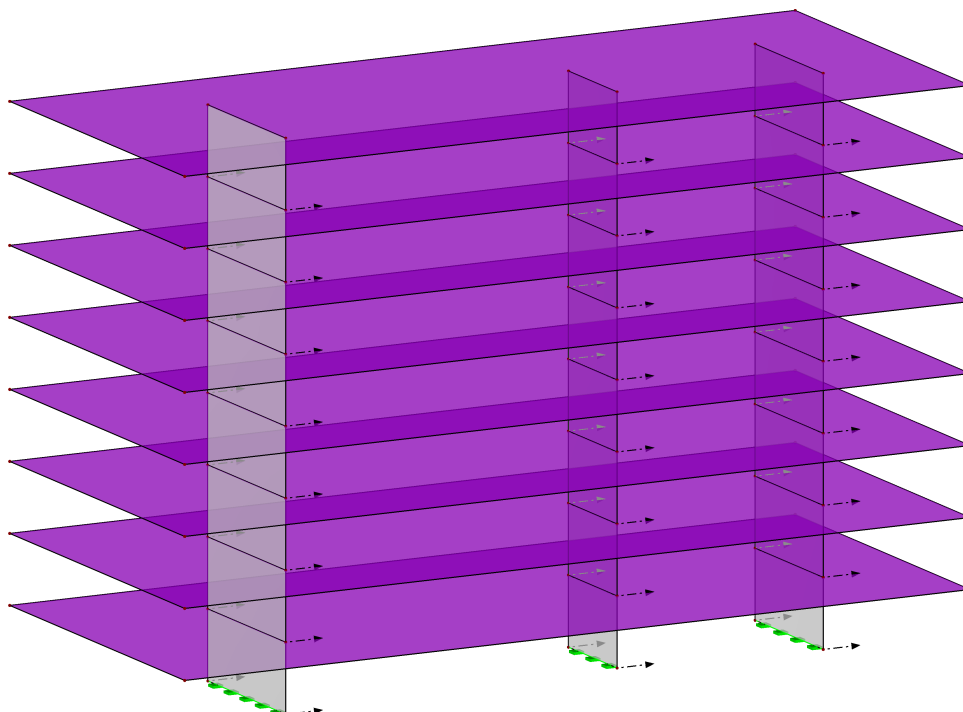
4.1 FEM-laskenta

FEM-laskenta suoritetaan Dlubal RFEM -ohjelmiston versiolla 5.10. Rakenteista tehdään monoliittiset rakenteet, ja luetaan elementtien liitoskohtiin syntyneet rasitukset. Kaikki rakenteet mallinnetaan kuorielementteinä. Elementtiverkon (*FE mesh*) silmäkoon perusarvona käytetään ensimmäisessä laskentatapauksessa arvoa 0,5 m. Toisessa tapauksessa käytetään arvoa 0,1 m, jotta saadaan tarkempia arvoja.

Pysyville kuormille, eli välipohjien ja väliseinien omalle painolle tehdään oma kuormitus tapaus. Muuttuville kuormille, eli sekä tuulikuormalle että lisävaakavoimalle tehdään myös omat kuormitustapaukset. Kuormitustapauksista muodostetaan laskennassa käytettävät kuormitusyhdistelmät.

Tulosten lukemista varten luodaan poikkileikkaukset koko seinän pituisille tasosille sekä elementtien pituisille. Poikkileikkauksien kohdilta luetaan resultanttivoimat sekä voimajakaumat diagrammimuodossa. Diagrammit jaetaan tarpeen mukaan osa-alueisiin, jos jakaumassa on sekä positiivisia että negatiivisia arvoja.

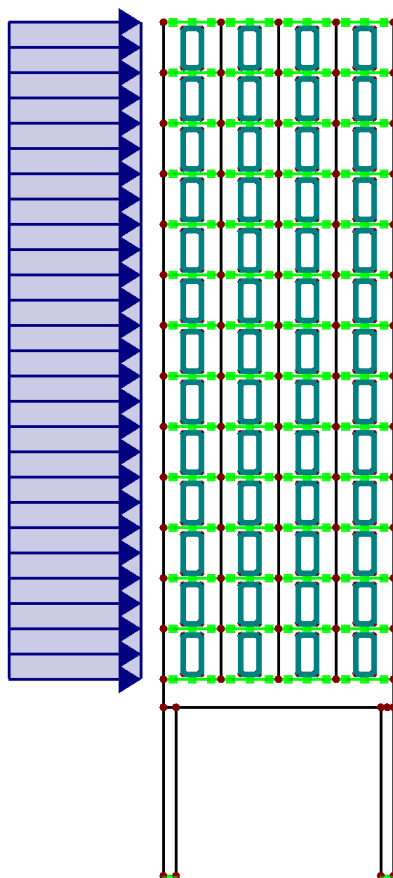
Ensimmäisen laskentatapauksen FEM-rakennemalli on esitetty kuvassa 19. Siinä välipohjat on mallinnettu jäykkinä tasoelementteinä. Tasoelementit ovat tasossaan jäykkiä, mutta tasoa vastaan kohtisuorassa suunnassa ne ovat joustavia. Seinien alimmat tuennat mallinnetaan täysin jäykiksi rajoittaen siirtymät ja kiertymät joka suuntaan.



Kuva 19. Ensimmäisen laskentatapauksen FEM-rakennemalli

Lisävaakavoima mallinetaan kuvan 19 tapauksessa tason suuntaisena tasokuormana. Tuulikuorma sen sijaan lisätään malliin viivakuormana tasoille. Välipohjien pysyvä kuorma mallinnetaan viivakuormana jokaiselle väliseinäelementille erikseen. Väliseinien oma paino saadaan otettua huomioon aktivoimalla oma paino -valinta pysyvien kuormien kuormitustapauksessa. Tulosten lukemista varten luodaan poikkileikkaukset (section) seinien kohtiin, joissa vaakasaumat sijaitsevat.

Seuraavaksi käydään läpi toisen laskentatapauksen FEM-mallinnus. Kuvassa 20 on esitetty tämän FEM-rakennemalli.



Kuva 20. Toisen laskentatapauksen FEM-rakennemalli

Laskentatapauksen FEM-mallissa välipohjien ja seinien liitokset mallinnetaan nivelelliset tuet, jotta laskenta saadaan suoritettua. Kyseiset tuet ovat niveliä, joissa vain tasoa vastaan kohtisuora suunnan siirtymät on rajoitettu. Pilarien alapään tuki mallinnetaan täysin jäykäksi liitokseksi. Tuulikuorma lisätään kuvan 20 mukaisesti viivakuormana ja lisävaaka-

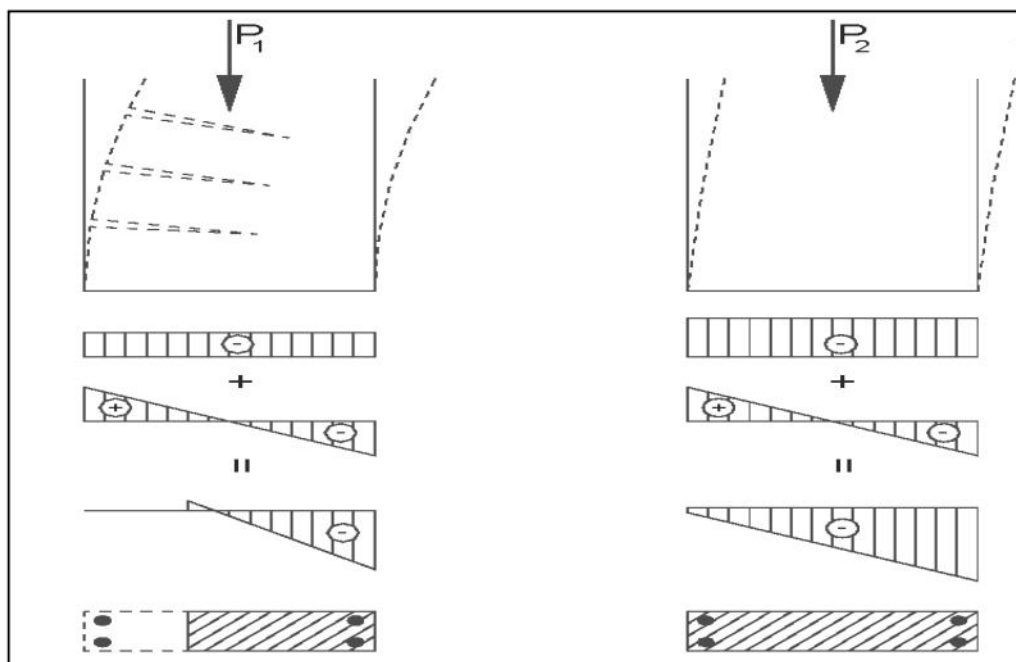
voima vaakasaumojen kohdilla vaikuttavana kuormana. Välipohjien pysyvä kuorma mallinnetaan viivakuormana jokaiselle väliseinäelementille erikseen. Väliseinien oma paino otettiin huomioon kuten aikaisemmin.

Toiseen laskentatapaukseen liittyen luotiin kolme uutta vertailumallia. Vertailumallit luotiin poistamalla alkuperäisestä tapauksesta ensin aukot, sitten palkki ja lopuksi molemmat edellä mainituista. Tulokset tuotiin eri poikkileikkauksista excel-taulukoihin, joista vertailu oli helpompi tehdä.

4.2 Käsinlaskenta

Käsinlaskenta tehdään yksinkertaisin menetelmin Excel-taulukoiden avulla. Laskuissa kaikkien rakenneosien kimmokertoimet oletetaan samoiksi. Ensimmäisessä laskentatapauksessa lasketaan voimien jakautuminen jäykistäville seinille. Voimien jakautumisen laskentaperiaatteet on esitetty luvussa 2.3.

Kuvassa 21 on esitetty normaalijännityksen jakautumisen kaksi mallia. Laskennassa oletetaan, että rakoja elementtien saumoihin ei synny, koska suuret vetojännitykset saadaan siirrettyä liitososien avulla. Tässä tapauksessa jakaumat vastaavat kuvan 21 oikean puolesta tapausta.



Kuva 21. Normaalijännitys jakauman periaate (BES 2010)

Kuvassa 21 lopullinen normaalijännitysjaakauma on saatu lisäämällä pystykuomista aiheutuvaan normaalijännitysjaakaumaan taivutuksesta syntyvä jakauma. Jos pystykuormaa on tarpeeksi, se kumoaa taivutuksesta aiheutuvan vedon ja liitos on kokonaan puristettu.

Veto taas syntyy, jos taivutuksesta aiheutuvaa vetoa ei saada kumottua pystykuormien avulla.

Toisessa laskentatapauksessa leikkausjännityksen jakautuminen seinän poikkileikkauksessa on laskettu käyttäen kimmoteorian mukaista Jourawskin leikkausjännityskaavaa:

$$\tau_{xy}(x) = \frac{VQ(x)}{I_z b}, \quad (11)$$

jossa $\tau_{xy}(x)$ on leikkausjännitys poikkileikkauksen kohdassa x , V on vaikuttava leikkausvoima poikkileikkauksessa, $Q(x)$ on tarkastelukohdan ala- tai yläpuolelle jäävän poikkipinnan staattinen momentti, I_z on poikkipinnan pääneliömomentti ja b on poikkileikkauksen leveys. (Roylance 2000)

Kaavan 11 mukaan leikkausvoima jakaantuu seinän poikkileikkauksessa parabolisesti. Yhden seinäelementin leikkausvoiman resultantti saadaan siten integroimalla kaavaa 11 yhden elementin leveyden yli.

4.3 Toisen kertaluvun vaikutukset

Laskennassa ei oteta huomioon toisen kertaluvun vaikutuksia. Eurokoodin mukaan toisen kertaluvun vaikutukset voidaan jättää huomioimatta, mikäli rakennekokonaisuus täyttää eurokoodissa esitetyt ehdot. (SFS-EN 1992-1-1 :2015)

Toisen kertaluvun vaikutuksia ei tarvitse huomioida, jos jäykistysjärjestelmässä ei synny merkittäviä leikkausmuodonmuutoksia ja seuraava ehto täyttyy:

$$F_{V,Ed} \leq 0,1 * F_{V,BB}$$

Ehdossa $F_{V,Ed}$ on pystysuuntainen kokonaiskuorma, joka vaikuttaa jäykistäviin ja jäykistettäviin osiin ja $F_{V,BB}$ on rakennekokonaisuuden nimellinen nurjahduskuorma. Toisin sanoen, rakennekokonaisuuden varmuus nurjahtamista vastaan täytyy olla 10 kertainen.

Jos kuitenkin jäykistysjärjestelmässä syntyy merkittäviä rakennekokonaisuuden leikkausmuodonmuutoksia, voidaan toisen kertaluvun vaikutukset jättää huomioimatta, jos seuraava ehto täyttyy:

$$F_{V,Ed} \leq 0,1 * F_{V,B} = 0,1 * \frac{F_{V,BB}}{1 + \frac{F_{V,BB}}{F_{V,BS}}}$$

$F_{V,B}$ on rakennekokonaisuuden nurjahduskuorma, jossa on otettu huomioon sen käyristymä sekä leikkausmuodonmuutos. $F_{V,BS}$ on vastaava nurjahduskuorma, jossa on otettu huomioon pelkästään leikkausvoiman vaikutukset. Rakennekokonaisuuksien nurjahduskuormien määrittästä ei käydä tässä läpi, ne ovat esitetty Eurokoodissa tarkemmin. (SFS-EN 1992-1-1 :2015)

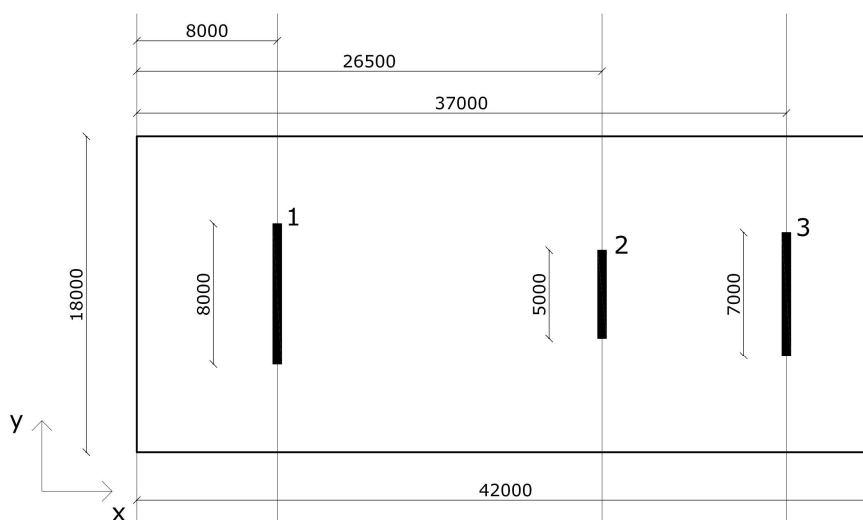
4.4 RAKENNUKSEN JÄYKISTÄVIEN SEINIEN VAAKASAUMOJEN VOIMASUUREET

Tässä laskelmassa tehdään jäykistystarkastelu 8-kerroksiselle toimistorakennukselle. Aluksi tutkitaan voimien jakaantumista jäykistäville rakenteille, jonka jälkeen määritellään kuormat ja niitä vastaavat jännitykset jäykistysrakenteen eri korkeuksilla. Tuloksia vertaillaan rakennuksen FEM-mallista saatuihin tuloksiin. Lopuksi tutkitaan vielä kitkan vaikutusta.

Rakennus on 8-kerroksinen ja sen jäykistykseen on käytetty elementtirakenteisia leikkausseiniä. Välipohjina ja yläpohjana toimivat ontelolaatat. Toisen kertaluvun vaikutuksia ei huomioida laskennassa. Perustelut toisen kertaluvun vaikutuksien huomioimatta jättämiselle ovat esitetty kappaleessa 4.3.

4.4.1 Voimien jakaantuminen jäykistäville rakenteille

Lasketaan vaakavoimien jakaantuminen jäykistäville seinille tapauksessa, jossa tuuli vaikuttaa pidemmällä sivulla. Rakennusta y-suunnassa jäykistävien seinien sijainti on esitetty kuvassa 22. Tarkastelussa oletetaan, että välipohjat toimivat tasoissaan jäykkinä rakenteina, jolloin voimat jakaantuvat jäykistäville seinille niiden jäykkyyksien suhteessa. Voimien jakautumisen laskenta tehdään luvussa 2.3 esitettyjen periaatteiden mukaisesti. Jäykistävien seinien liitokset vaakakuormia jakaviin levykenttiin oletetaan nivelellisiksi.



Kuva 22. Jäykistävien seinien sijainti tasossa

Jäykistävät seinäelementit ovat kaikki 240 mm paksuja ja 3,5 m korkeita. Koska seinien kimmokertoimet oletetaan samoiksi ja välipohjat ovat tasoissaan jäykkiä rakenteita, voidaan voimien jakaantuminen seinille laskea kaavalla 1. Tulokset ovat esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3. Voimien jakaantuminen seinille

Seinä nro	Seinän ottama osuus kokonaisvoimasta [%]
1	54,01
2	12,55
3	33,44

Taulukosta havaitaan, että mitä suurempi on seinän jäykkyys, sitä suurempi on sen ottama osuus vaakakuormista. Jäykin seinä on seinä numero 1, jolle vaakarakenteet välittävät yli puolet vaakakuormista.

4.4.2 Kuormat

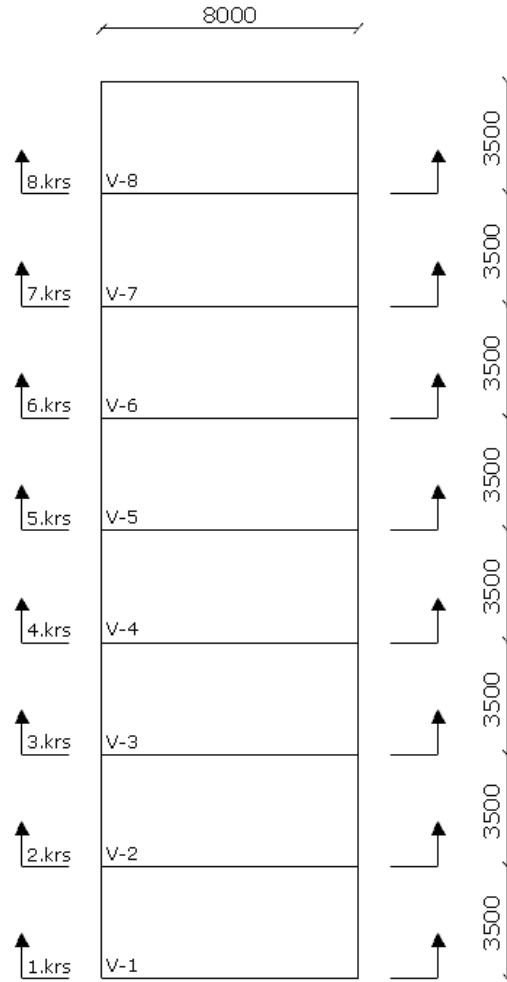
Seinän 1 kuormitukset on määritelty liitteessä 1. Tässä laskelmassa tutkitaan kuormitus-tapausta, jossa seinien välisiin saumoihin syntyy suurin vetojännitys. Vaakasuntaiset ulkoiset kuormat aiheuttavat kaatavia momentteja ja vetojännityksiä seinäelementtien saumoihin. Pystysuuntaiset pysyvät kuormat sen sijaan ovat edullisia, koska ne pyrkivät kuomaamaan vaakakuormien kaatavaa vaikutusta. Koska tarkastellaan suurimpia mahdollisia vetojännityksiä, on määrääväksi kuormitusyhdistelmäksi valittu:

$$0,9 * Omapaino + 1,15 * Lisävaakavoima + 1,5 * Tuulikuorma,$$

jossa 0,9 on pysyvien kuormien osavarmuuskerroin, koska omanpainon vaikutus on tässä edullista. Tuulikuormaa pidetään määräävänä ja sen osavarmuus kerroin on silloin 1,5. Koska lisävaakavoima tässä tapauksessa on pysyvien kuormien funktio, eikä ole edullinen kuorma, valitaan sen osavarmuuskertoimeksi 1,15.

4.4.3 Voimasuureiden käsinlaskenta

Seinä 1 koostuu päällekkäisistä seinäelementeistä. Se on jaettu tarkastelutasoihin, jotka ovat seinäelementtien vaakaliitosten kohdilla. Tarkastelutasot, elementtien mitat ja elementtitunnukset ovat esitetty kuvassa 23. Tuuli sekä lisävaakavoimat vaikuttavat kuvasta 23 katsottuna vasemmalta oikealle.



Kuva 23. Seinä 1

Taulukossa 4 on esitetty seinien vaakasaumojen kohtiin syntyvät vetojännitysvyöhykkeiden leveydet, saumoihin syntyvät vetovoimat sekä yhdistetty jännitys seinän vedetyssä reunassa. Vetovyöhyke määrittelee alueen, jolla vaakasaumassa vaikuttava normaalijännitys on vetoa. Laskenta on tehty liitteessä A.

Taulukko 4. Seinän 1 vetotarkastelu.

Seinä 1 krs	Yhdistetty jännitys vedetyssä reunassa σ_3 [MPa]	vetovyöhykkeen leveys [m]	Syntyvä vetovoima [kN]
8	-0,115	0,00	0
7	-0,063	0,00	0
6	0,156	0,83	15,6
5	0,543	1,62	105,7
4	1,097	2,10	276,1
3	1,818	2,42	526,8
2	2,706	2,64	857,8
1	3,761	2,81	1269,0

4.4.4 Vertailu

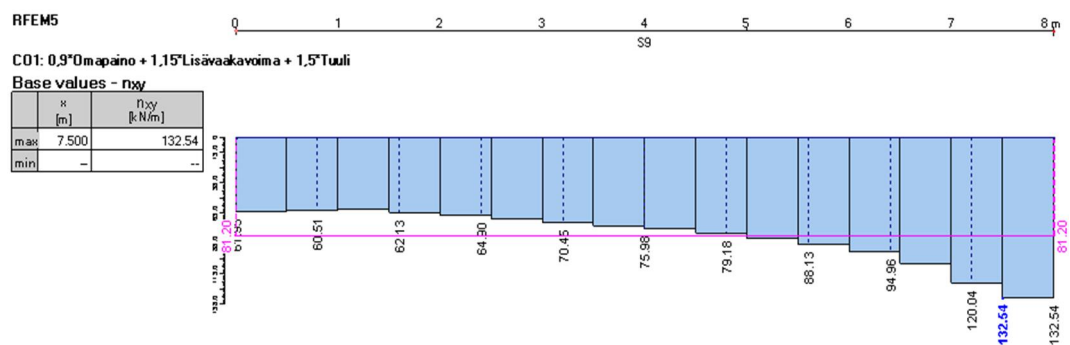
Rakenteista tehtiin laskentamalli Dlubalin RFEM-ohjelmistolla ja laskettiin voimasuureet samalla kuormitusyhdistelmällä, kuin mitä käytettiin käsinlaskennassa. FEM-mallissa vaakakuormien suhteellinen jakaantuminen kerroksittain vaihteli hieman. Vaihteluväli oli noin 2 prosenttiyksikköä. Leikkausvoimien jakaantumisen vertailu on tehty taulukossa 5, jossa FEM-laskennan kuormien jakaantuminen on luettu alimmasta kerroksesta.

Taulukko 5. Leikkausvoimien jakaantumisen vertailu

Seinä nro	Käsinlaskenta [%]	FEM-laskenta [%]	Ero [%]
1	54,01	47,70	6,31
2	12,55	20,63	-8,08
3	33,44	31,67	1,77

Taulukosta nähdään, että eroa käsinlaskennan ja FEM-laskennan välillä syntyy hieman. FEM-mallissa seinä 2 saa 8 prosenttia enemmän kuormaa kuin käsinlaskennassa.

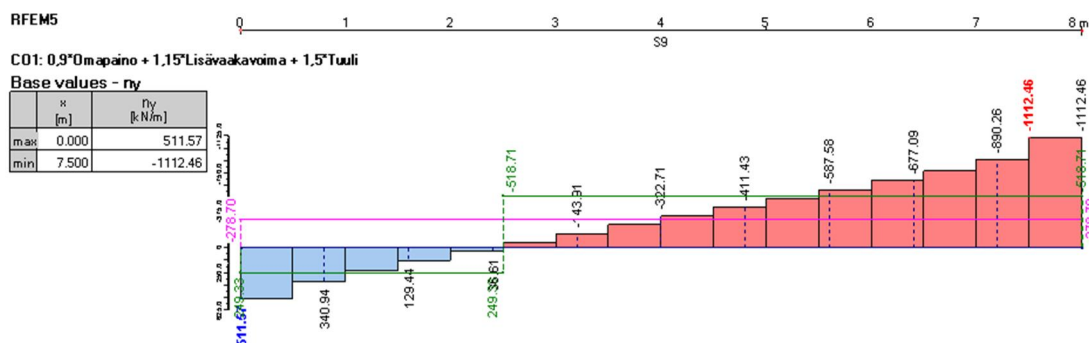
Seuraavaksi vertaillaan yksittäisen elementtisauman rasituksia. Tutkittavaksi tarkastelutasoksi valitaan seinän 1 väliseinäelementtien V-2 ja V-3 välinen vaakasauma. Väliseinäelementtien tunnuksat ovat esitetty aiemmin kuvassa 23. Tutkittavan liitoksen FEM-laskennasta saatu leikkausvoimajakauma on kuvassa 24, johon on merkitty myös leikkausvoiman keskiarvo yksikössä kN/m.



Kuva 24. Seinän 1 leikkausvoimajakauma elementin V-3 alareunassa

Kuvasta 24 saadaan leikkausvoiman keskiarvoksi 81,2 kN/m. Kun tämä kerrotaan elementin leveydellä, 8 metriä, saadaan leikkausvoimaresultantiksi 649,6 kN. Käsinlaskennassa vastaavaksi resultantiksi saatiin 733,9 kN. Eroa on 84,3 kN.

Seuraavaksi tarkastellaan saman sauman normaalijännitys jakaumaa. Kuvassa 25 on normaalijännitys jakauma, johon on merkitty puristuksen ja vedon keskiarvot yksikössä kN/m.



Kuva 25. Seinän 1 normaalivoimajakauma elementin V-3 alareunassa

Kuvasta 25 huomataan, että saumaan syntyy sekä vetoa, että puristusta. Vetojännitysvyöhykkeen pituudeksi saatiin 0,5 metrin tarkkuudella 2,5 metriä. Käsinlaskennassa vastaavaksi vetovyöhykkeen pituudeksi saatiin 2,42 metriä. Vetovoiman resultantiksi saatiin FEM-laskennasta 623,33 kN ja käsinlaskennasta 526,8 kN. Eroa on 96,53 kN.

4.4.5 Kitka

Tässä kohdassa tarkastellaan kitkan vaikutusta esimerkkilaskelman tapauksessa. Kitkaa voidaan käyttää hyväksi vain alueella, jossa on puristusjännitystä. Eurokoodin mukaan vaakasauman kitkakertoimen voitaisiin käyttää arvoa 0,5 tai 0,6, riippuen pinnan laadusta.

Vaakasaumoissa käytetään lyhyttä vaarnatappiliitosta. Aiemmin luvussa 3.2.2 mainittiin, että lyhyillä vaarnatapeilla toteutettu liitos vaatii täyden kapasiteettinsa saavuttamiseen saumansuuntaisen siirtymän, joka on suuruudeltaan 10 % vaarnatapin halkaisijasta. 32 mm paksulla tapilla tämä siirtymä on siis 3,2 mm. Koska saumassa tapahtuu liikettä, on huomattavaa että, kyseessä ei ole enää lepokitka, vaan liikekitka. Sen vuoksi tehdään kitkatarkastelu myös liikekitkakertoimella. Liikekitkakertoimenä käytetään arvoa 0,27 (RIL-115). Taulukossa 6 on esitetty kitkavoimien arvot eri tasoilla.

Taulukko 6. Kitkan vaikutus

Kitkatarkastelu				
kr	Leikkausvoima [kN]	Kitkavoima [kN] $\mu=0,5$	Kitkavoima [kN] $\mu=0,27$	Liitinosille jäävä osuus [kN]
8	122,3	190,8	103,0	19,3
7	244,6	381,6	206,1	38,6
6	366,9	572,4	309,1	57,8
5	489,3	763,2	412,1	77,1
4	611,6	954	515,2	96,4
3	733,9	1144,8	618,2	115,7
2	856,2	1335,6	721,2	135,0
1	978,5	1526,4	824,3	154,3

Taulukosta huomataan, että kitkakertoimella 0,5 kitkavoima pystyy siirtämään kaiken leikkausvoiman. Jos kuitenkin ajatellaan, että saumassa tapahtuu siirtymää ja syntyvä kitka on liikekitkaa, ei kitkavoima enää riitä, vaan tarvitaan liitinosia siirtämään jäljelle jäävä leikkausvoima.

4.4.6 Yhteenveto

Eroja FEM-laskennan ja käsinlaskennan tuloksissa aiheutti enimmäkseen poikkeavuudet vaakakuormien suhteellisessa jakautumisessa laskentojen välillä. Erot olivat pieniä ja suurimmillaan 8 prosenttia. Yksinkertaista käsinlaskentaa käytetään tulosten suuruusluokkien tarkastamiseen ja suuruusluokaltaan tulokset olivat samoilla linjoilla, joten käsinlaskenta sopi hyvin esimerkkitapauksen laskentaan. Erot vaakaliitosten rasituksissa johtuivat pääosin eroista vaakakuormien jakautumisessa seinien kesken.

Eroja vaakakuormien jakautumisen suhteen voidaan selittää käsinlaskentausekkeiden idealisoinneilla, joita joudutaan tekemään laskennan yksinkertaistamiseksi. Levyjäykistetyissä rakennuksissa syntyy aina jäykistävien pystyrakenteiden sekä levykenttien muodonmuutoksia, joita ei oteta huomioon käsinlaskennassa. Edellä mainittuja muodonmuutoksia ovat esimerkiksi pystyrakenteiden leikkausmuodonmuutokset, levykenttien paikalliset muodonmuutokset sekä leikkaus- ja taivutusmuodonmuutokset (Hokkanen 2016).

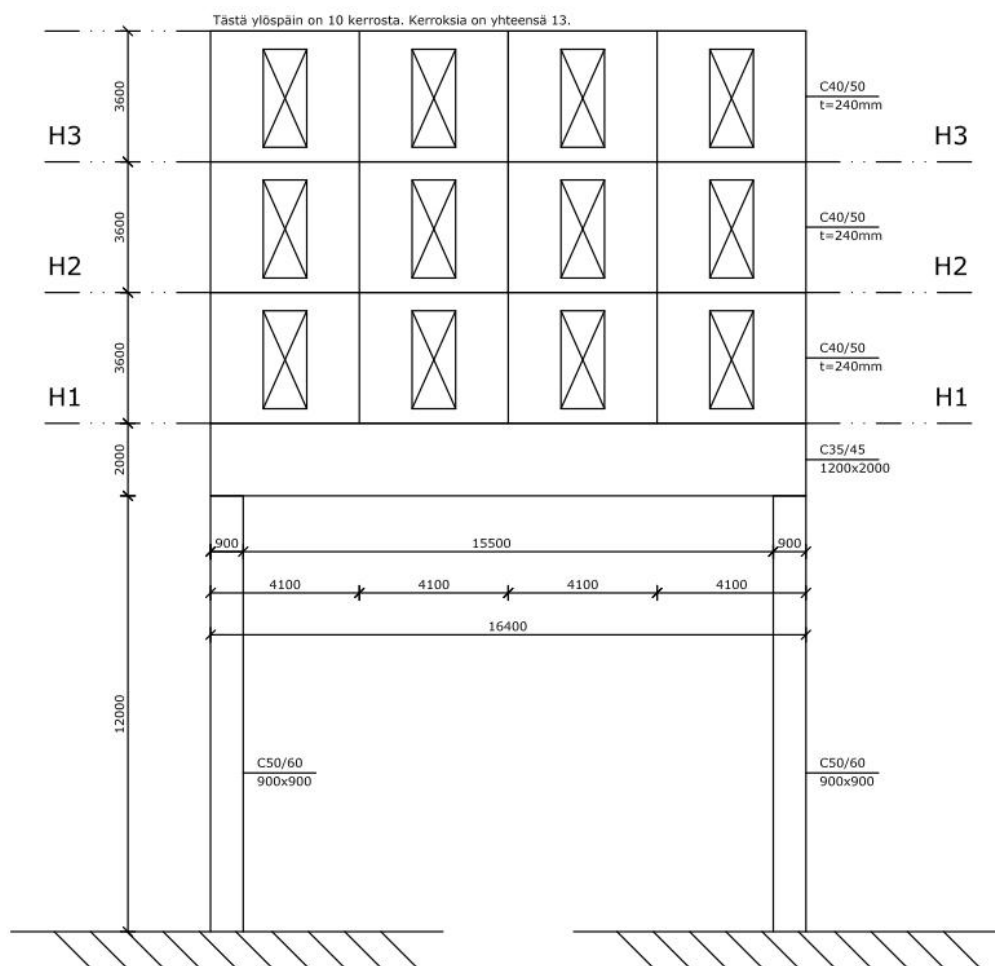
Kitka kertoimella 0,5 leikkauskapasiteetti oli riittävä, eikä liitinosia mitoituksen kannalta tarvittaisi. Kuitenkin, jos oletettiin saumaan syntyvän liikettä ja asetettiin kitkakertoimeksi 0,27, tarvittiin liitinosia siirtämään jäljelle jäänyt leikkausvoima.

4.5 JÄYKISTÄVÄN SEINÄN VAAKASAUMOJEN VOIMASUUREET JA MITOITUS

Tässä laskelmassa tutkitaan erään toteutetun rakennuskohteen jäykistystä. Rakennus on jäykistetty seinillä sekä porras- ja hissikuiluilla, jotka tukeutuvat jäykkiin betonikehiin.

Välipohjina ja yläpohjana toimivat ontelolaatat. Tässä laskelmassa ei tutkita leikkausvoimien jakautumista eri jäykistysrakenteiden kesken, vaan keskitytään päätyseinän vaakasaumoihin ja niissä kulkeviin voimiin. Toisin kuten esimerkklaskelmassa, nyt tutkitavalle mastoseinälle välittyvä osuus vaakakuormista on täysin sama FEM-laskennassa ja käsinlaskennassa.

Tarkasteltavana rakenteena on rakennuksen jäykistävä päätyseinä, jossa on paljon aukkoja. Päätyseinä on toteutettu elementtirakenteisena ja se on alapäästään tuettu siirtopalkkiin. Kyseessä on leikkausseinä-siirtopalkki –rakenne (shearwall-transferbeam structure). Palkki on päistään tuettu pilareilla, jotka ovat jäykästi kiinnitetty maahan. Koko rakenteen alaosa dimensioineen on esitetty kuvassa 26. Seinärakenne on yhteensä 13-kerroksinen, ja yhdessä kerroksessa on neljä keskeisesti aukotettua seinäelementtiä. Kaikki aukot ovat kooltaan 1200x2700.



Kuva 26. Tutkittava rakenne, kuvassa 3 alinta kerrosta

Kuvaan on merkitty ensimmäiset kolme tarkastelutasoa H1, H2 ja H3. Tarkastelutasot ovat seinäelementtien vaakasaumojen kohdilla.

4.5.1 Kuormat

Päätyseinän kuormitukset on määritetty liitteessä 2. Laskennassa on käytetty samaa kuormitusyhdistelmää kuin esimerkkilaskelmassa:

$$0,9 * Omapaino + 1,15 * Lisävaakavoima + 1,5 * Tuulikuorma,$$

jossa 0,9 on pysyvien kuormien osavarmuuskerroin, kun omanpainon vaikutus on edullista. Tuulikuormaa pidetään määräävänä ja sen osavarmuus kerroin on silloin 1,5. Koska lisävaakavoima tässä tapauksessa on pysyvien kuormien funktio, eikä edullinen kuorma, valitaan sen osavarmuuskertoimeksi 1,15. Tuuli sekä lisävaakavoima vaikuttavat kuvasta 24 katsottuna vasemmalta oikealle.

4.5.2 Voimasuureiden käsinlaskennan tulokset

Seinärakenne on jaettu samalla tavalla tarkastelutasoihin kuin esimerkkilaskelman tapauksessa. Laskelmat on suoritettu liitteessä 2. Taulukossa 7 on esitetty kolmen ensimmäisen tarkastelutason vetojännitysvyöhykkeiden leveydet sekä saumoihin syntyvät vetovoimaresultantit.

Taulukko 7. Seinän vetotarkastelu

Tarkastelu-taso	Vetovyöhykkeen leveys [m]	Syntyvä vetovoima [kN]
H3	3,35	425,7
H2	3,76	636,1
H1	4,10	888,7

Taulukosta 7 huomataan, että H1-tason vetovyöhyke on yhtä leveä kuin yksi elementti, eli elementti V11 on täysin vedetty. Taulukossa 8 on leikkausvoima- sekä puristusresultantit eri tarkastelutasoilla.

Taulukko 8. Tasojen leikkaus- ja puristusvoimaresultantit

Tarkastelu-taso	Leikkausvoima [kN]	Pystykuormista Puristus [kN]
H3	1406,90	6025,5
H2	1534,80	6573,3
H1	1662,70	7121,1

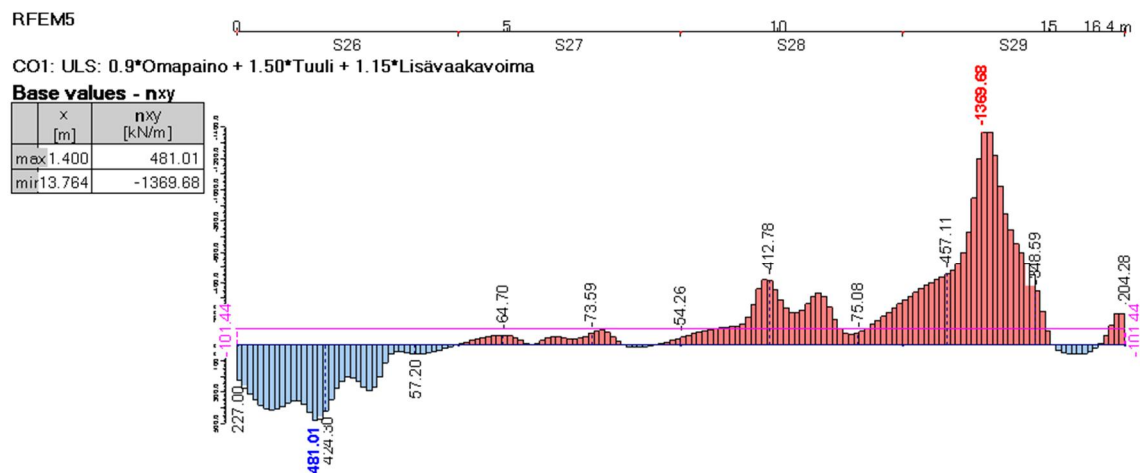
Taulukossa 9 on esitetty elementtien leikkausvoimaresultantit sekä normaalivoimaresultantit tasolla H1. Taulukossa normaalivoiman negatiivinen arvo on vetoa.

Taulukko 9. Leikkausvoimaresultantit tasolla H1

Tarkastelutaso H1				
Elementti	V11	V12	V13	V14
Leikkausvoiman resultantti [kN]	259,8	571,6	571,6	259,8
Normaalivoiman resultantti [kN]	-888,7	890,6	2670,0	4449,0

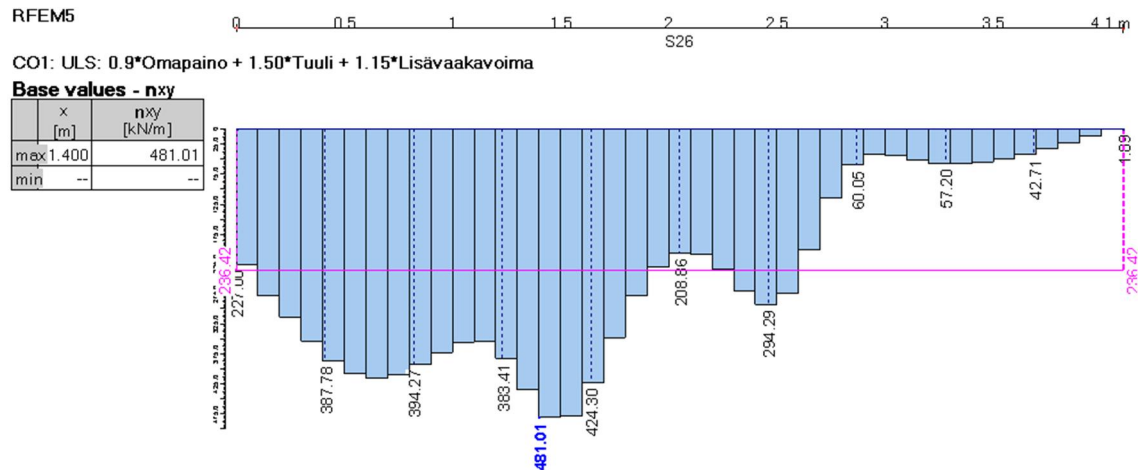
4.5.3 Vertailu

Rakenteesta tehtiin FEM-laskentamalli ja laskettiin voimasuureet vastaavalla kuormitusyhdistelmällä. Kuvassa 27 on esitetty FEM-laskennasta saatu leikkausvoimajakauma tarkastelutasolla H1, eli seinien alimmassa vaakasaumassa.

**Kuva 27.** Leikkausvoimajakauma tasolla H1

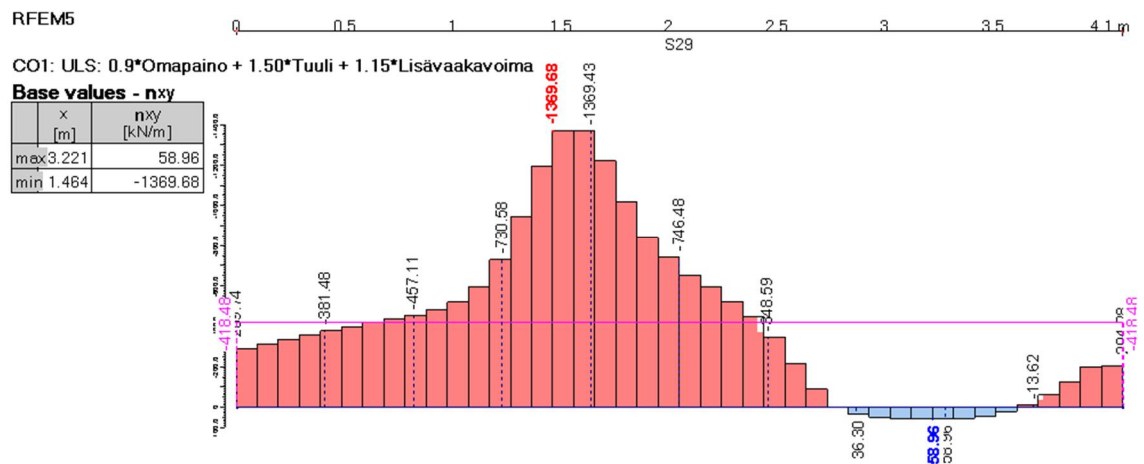
Kuvasta 27 huomataan, että leikkausvoimaa syntyy kahteen eri suuntaan. FEM-laskennassa leikkausvoiman resultantiksi saatiin 1663,6 kN. Käsinslaskennassa vastaava arvo oli 1662,7 kN. Leikkausvoiman resultanteissa eroa ei täten juurikaan synny. Tilanne kuitenkin muuttuu, jos tarkastellaan samaa leikkauspintaa, mutta jaetaan pinta elementtien kesken neljään palaan.

Tarkastellaan seuraavaksi seinäelementtien V11 ja V14 leikkausvoimajakaumia tarkastelutasolla H1. Kuvassa 28 on esitetty elementin V11 leikkausvoimajakauma.



Kuva 28. Elementin V11 leikkausvoimajakauma tasolla H1

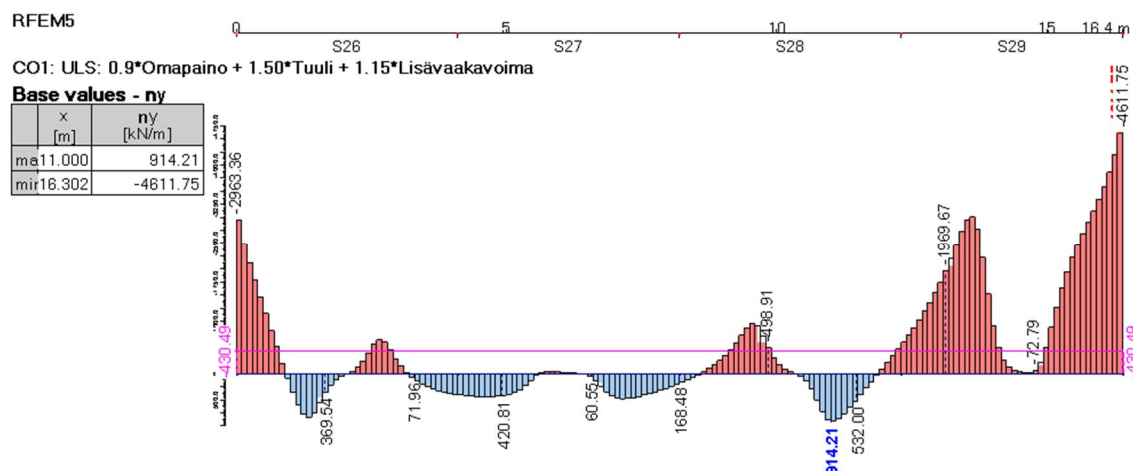
Elementin V11 leikkausvoimapinnan resultantiksi saatiin 969,3 kN. Käsinelaskennassa vastaavaksi resultantiksi saatiin 259,8 kN. Elementin V14 leikkausjännitys jakauma on esitetty kuvassa 29.



Kuva 29. Elementin V14 leikkausvoimajakauma tasolla H1

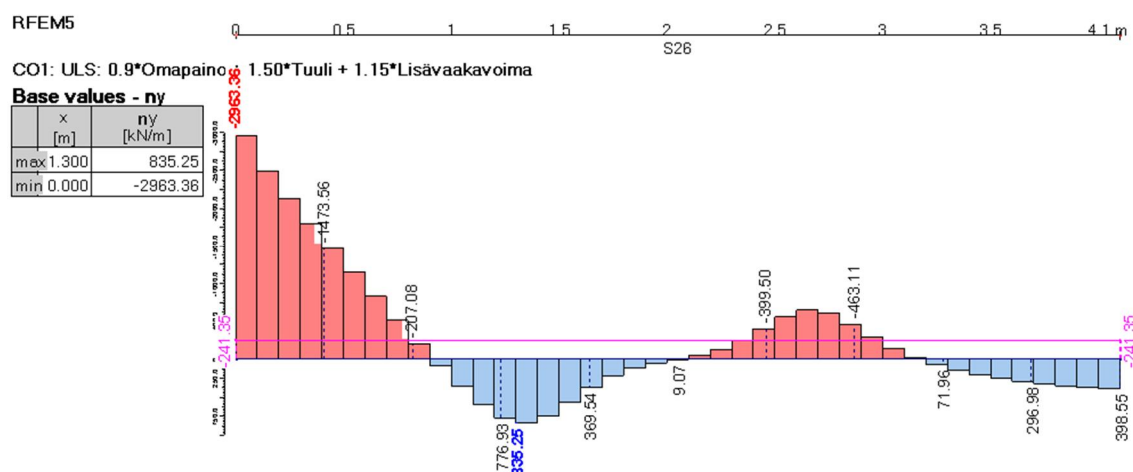
Elementin V14 leikkausvoimapinnan resultantiksi saatiin 1715,8 kN. Saatu arvo on yli 6-kertainen verrattuna käsinelaskennasta saatuun arvoon 259,8 kN. Taulukoista käy ilmi, että elementeissä V11 ja V14 vaikuttavat leikkausvoiman resultantit vaikuttavat vastakkaisiin suuntiin.

Tarkastellaan seuraavaksi normaalijännityksiä. Kuvassa 30 on tarkastelutason H1 normaalivoimajakauma. Normaalivoimajakaumaa esittävissä taulukoissa puristusvyöhykkeet ovat piirretty punaisella ja vetovyöhykkeet sinisellä.



Kuva 30. Normaalivoimajakauma tasolla H1

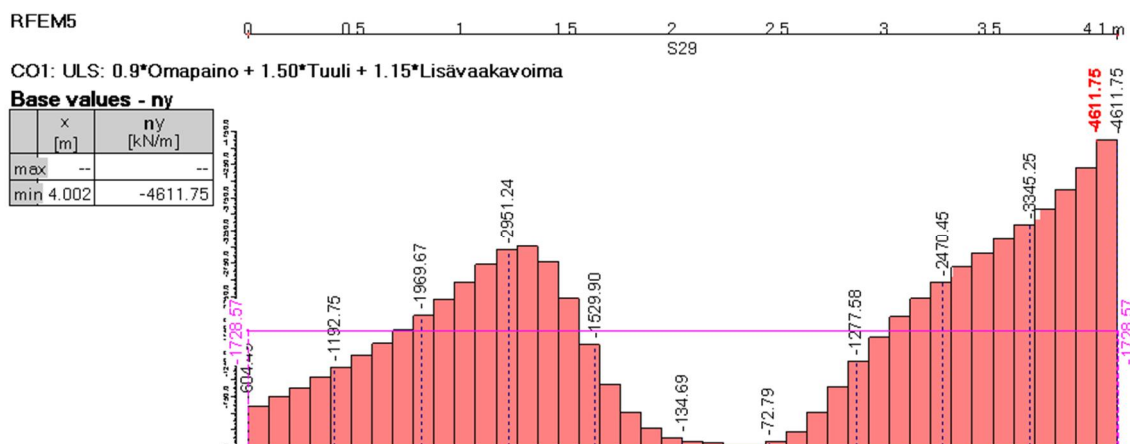
Normaalivoiman resultantiksi saatiin H1-tarkastelutasolla 7060 kN puristusta. Käsinslaskennassa vastaava arvo oli 7121 kN. Kuvassa 31 on esitetty elementin V11 normaalivoimajakauma.



Kuva 31. Elementin V11 normaalivoimajakauma

Elementin V11 normaalivoiman kokonaisresultantiksi saatiin 990,0 kN puristusta. Kuvassa 31 kuitenkin nähdään, että vaakasaumaan syntyy sekä puristusta että vetoa. Kun vetovyöhykkeet tarkasteltiin erikseen, saatiin niiden arvoksi vasemmalta oikealle 476,9 kN ja 243,4 kN. Käsinslaskennassa reunimmainen elementti V11 oli kokonaan vedetty, ja sen vetovoimaresultantiksi saatiin 888,7 kN.

Tarkastellaan sitten elementin V14 normaalijännityksiä. Kuvassa 32 on esitelty elementin V14 normaalivoimajakauma.



Kuva 32. Elementin V14 normaalivoimajakauma

Elementti V14 on taulukon mukaan kokonaan puristettu ja normaalivoiman resultantiksi saatiin 7087,1 kN. Käsinelaskennasta saatiin elementin V14 puristusresultantiksi 4449,0 kN. Eroa on 2638,0 kN.

4.5.4 Kitka

Kitkan vaikutus on tarkasteltu taulukossa 10 kuten esimerkkilaskelmassa. Leikkausvoiman arvot on saatu käsinelaskennasta, ja ne ovat kyseisen tason leikkausvoiman resultantteja. Koska tarkastelutasojen leikkausvoiman kokonaisresultanttien ja normaalijännitysresultanttien erot käsinelaskennan ja FEM-laskennan välillä olivat pienet, ei kitkatarkastelua tehty molempien laskentojen arvoilla. Kitkakertoimina on käytetty arvoja 0,5 ja 0,27.

Taulukko 10. Kitkan vaikutus

Kitkatar- kastelu			
Kerros	Leikkausvoima [kN]	Kitkavoima [kN] $\mu=0,5$	Kitkavoima [kN] $\mu=0,27$
13	127,9	273,9	147,9
12	255,8	547,8	295,8
11	383,7	821,7	443,7
10	511,6	1095,6	591,6
9	639,5	1369,4	739,5
8	767,4	1643,3	887,4
7	895,3	1917,2	1035,3
6	1023,2	2181,1	1183,2
5	1151,1	2465,0	1331,1
4	1279,0	2738,9	1479,0
3	1406,9	3012,8	1626,9
2	1534,8	3286,7	1774,8
1	1662,7	3560,5	1922,7

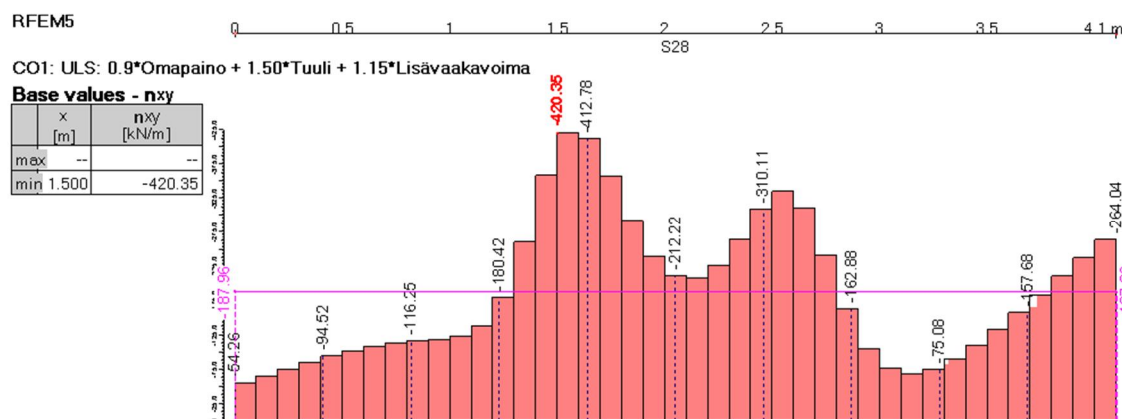
Taulukosta 10 huomataan, että molemmilla kitkakertoimen arvoilla kitkavoima pystyy välittämään leikkausvoiman resultantin kokonaan tasolla H1. Jos kuitenkin kitkan vaikutusta tarkastellaan elementtikohtaisesti, olisivat tulokset erilaisia. Esimerkiksi elementti

V11 on kokonaan vedetty alemmasta vaakasaumastaan, mistä syystä ei synny liikettä vastustavaa kitkavoimaa.

4.5.5 Elementin V13 saumojen mitoitus

Elementin V13 saumat mitoitettiin laskentatapauksesta saatujen tulosten perusteella. Koska työssä on keskitytty varsinaiseen mitoitusprosessiin, on mitoitus tehty vain yhdellä kuormitusyhdistelmällä. Käytännössä jokainen sauma tulisi siis tarkastella erikseen, ja etsiä niille oma mitoittava kuormitusyhdistelmä. Liitososien mitoitus on tehty FEM-laskennasta saaduilla arvoilla. Liitososien mitoituslaskelmat on tehty liitteessä C.

Tarkastellaan ensiksi elementin V13 alemman vaakaliitoksen leikkauskestävyyttä. Liitoksessa käytetään vaarnatappiliitosta.

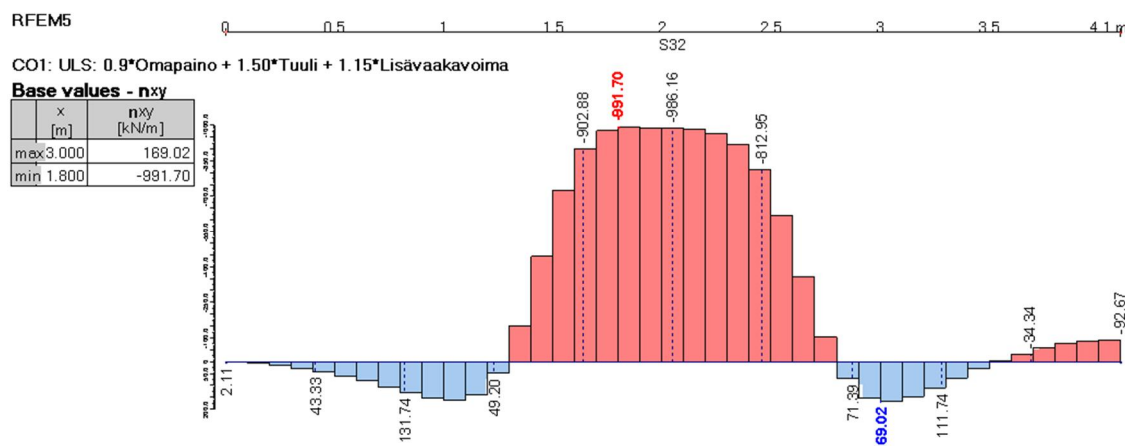


Kuva 33. Elementin V13 leikkausvoimajakauma tasolla H1

Elementin V13 alemman vaakasauman leikkausvoiman keskiarvoksi saatiin 188,0 kN/m, josta saadaan resultantiksi 770,6 kN. Mitoittava leikkausvoima on tässä tapauksessa helppo lukea kuvasta, koska leikkausvoima vaikuttaa vain yhteen suuntaan.

Leikkausvoima siirretään 32 mm paksujen vaarnatappien avulla. Vaarnatappeja tarvitaan saumaan yhteensä kahdeksan, jos kitkan vaikutusta ei oteta huomioon. Jos kitka huomioidaan, saadaan vaadittujen tappien lukumäärää vähennettyä. Kun laskennassa käytettiin liikekitkakerrointa 0,27, vähentyi tappien määrä kuuteen. Sen sijaan jos käytettiin kitkakertoimena arvoa 0,5, vähentyi tappien määrä viiteen.

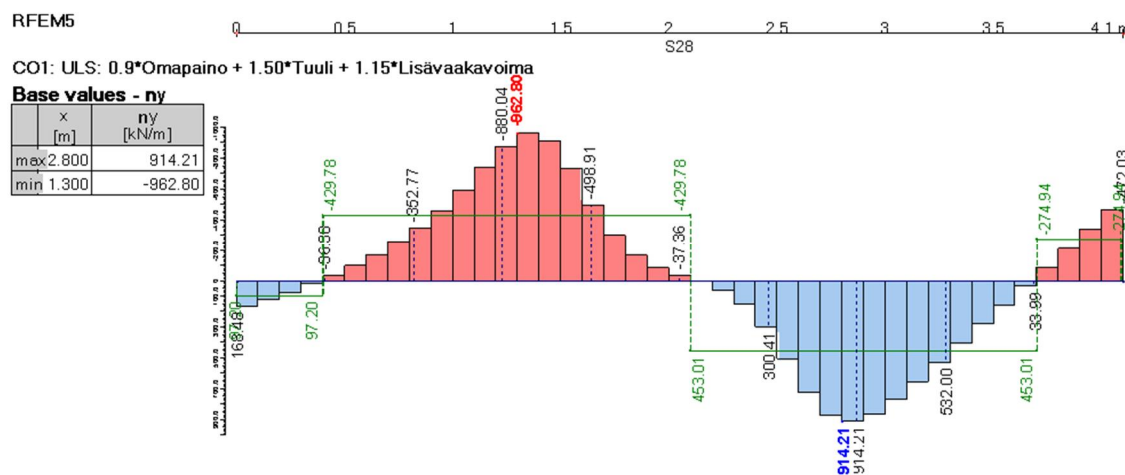
Seuraavaksi tarkastellaan elementin V13 ylemmän vaakasauman mitoittamista leikkausvoimille. Ylemmän vaakasauman leikkausvoimajakauma on esitetty kuvassa 34.



Kuva 34. Elementin V13 leikkausvoimajakauma tasolla H2

Leikkausvoimaa syntyy nyt molempiin suuntiin, mikä tekee mitoituksesta hieman hankalampaa. Leikkausvoiman määrittäminen tässä tapauksessa on hieman tulkinnan varaista, eikä selkeää ja yksiselitteistä ohjetta siihen ole. Yksi vaihtoehto on käyttää jakauman kokonaisresultanttia. Toinen vaihtoehto olisi tarkastella jokainen leikkausvyöhyke erikseen. Tässä on käytetty kyseisen liitoksen mitoittavana leikkausvoimana leikkausvoiman kokonaisresultanttia, joka on 954,4 kN. Vaarnatappeja tarvitaan saumaan yhteensä kymmenen, jos kitkan vaikutusta ei oteta huomioon. Kun syntynyt kitkavoima otetaan huomioon, vähentyy tarvittavien tappien määrä seitsemään kitkakertoimella 0,27 ja neljään kitkakertoimella 0,5.

Seuraavaksi tarkastellaan alemman vaakasauman normaalijännityksiä. Kuvassa 35 on esitetty elementin V13 alemman vaakasauman normaalivoimajakauma.

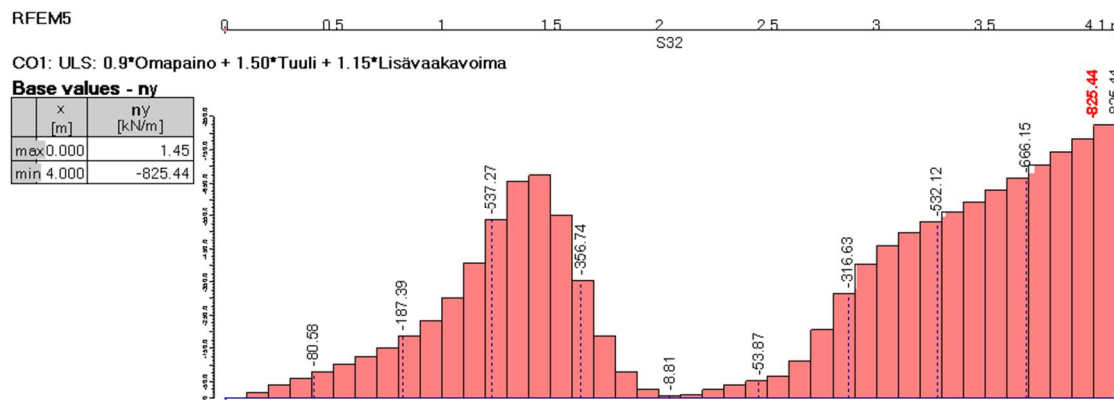


Kuva 35. Elementin V13 normaalivoimajakauma tasolla H1

Kuvasta 7 nähdään, että elementin alareunaan syntyy kaksi vetojännitysvyöhykettä ja kaksi puristusjännitysvyöhykettä. Kuvassa 7 on merkitty jokaisen eri vyöhykkeen normaalivoiman keskiarvo, joiden avulla voidaan laskea kyseisen vyöhykkeen resultantti

kertomalla resultantin arvo vyöhykkeen leveydellä. Vasemman puoleisen vetojännitys-vyöhykkeen vetoresultantti on 38,9 kN ja oikean puoleisen 724,8 kN. Pienempi veto-voima saadaan siirrettyä helposti esimerkiksi 16 mm pulttiliitoksella ja isompi 45 mm pulttiliitoksella. Pulttiliitosten kestävyys saadaan valmistajien omista taulukoista.

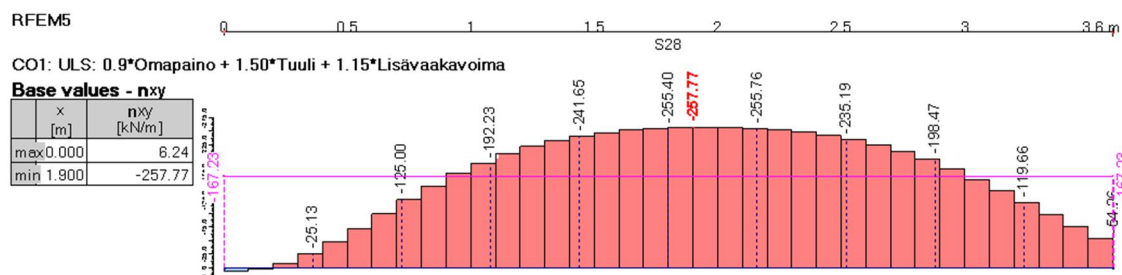
Tarkastellaan seuraavaksi ylemmän vaakasauman normaalijännityksiä. Kuvassa 36 on esitetty ylemmän vaakaliitoksen normaalivoimajakauma.



Kuva 36. Elementin V13 normaalivoimajakauma tasolla H2

Kuvasta 36 nähdään, että ylempään vaakasaumaan ei syntynyt vetoa, joten pulttiliitosta siellä tarvita. Saumassa voidaan kuitenkin käyttää pulttiliitosta helpottamaan elementin asennusta.

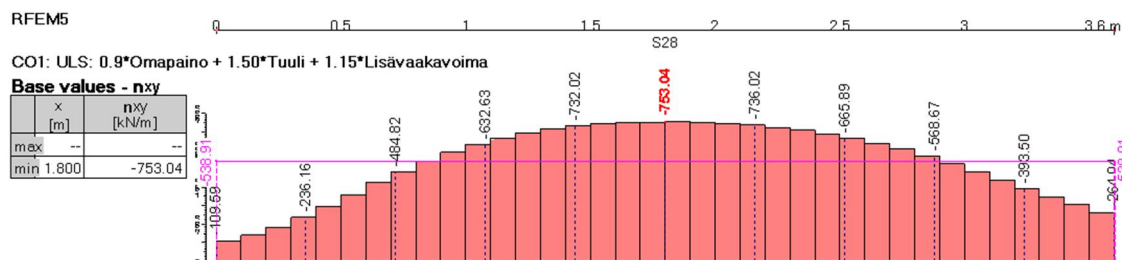
Tarkastellaan sitten elementin V13 pystysaumoja. Pystysaumojen leikkauskestävyyden mitoitus tehtiin työsauman leikkauskestävyyden mukaisesti kaavalla 3. Elementin pystysaumoissa käytetään vaarnattua teräslenkkitiitosta. Elementin V13 vasemman puolen pystysauman leikkausjännitysjakauma on kuvan 37 mukainen.



Kuva 37. Elementin V13 vasemman pystysauman leikkausvoimajakauma

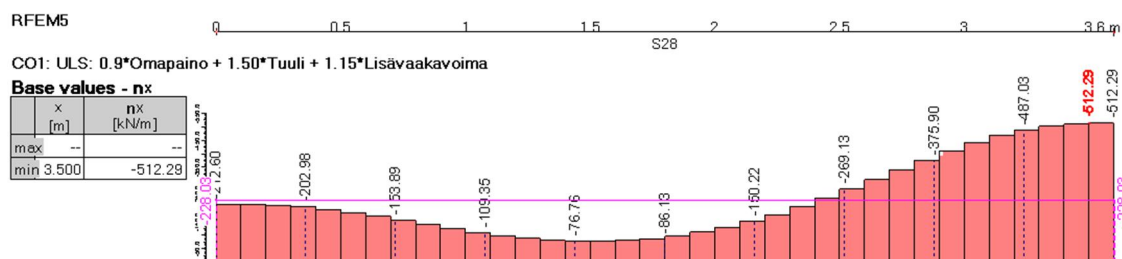
Pystysauman leikkausvoiman keskiarvoksi saadaan 167,2 kN/m. Sauman liitososiksi saatiin laskennassa 8 millin harjateräslenkit 200 millimetrin jaolla. Pystysauman mitoituksessa ei käytetty hyväksi sauman normaalijännityksestä aiheutuvaa kitkavoimaa.

Tarkastellaan viimeiseksi elementin V13 oikean puoleisen pystysauman mitoitusta. Kyseisen pystysauman leikkausjännitysjaakauma on kuvan 38 mukainen.



Kuva 38. Elementin V13 oikean pystysauman leikkausvoimajakauma

Leikkausvoimaa on nyt 538,9 kN/m. Saadulla voiman arvolla laskennassa sauman liitososiksi saatiin T12 harjateräsenkit 200 mm jakovälillä. Koska saatu jakoväli on suhteellisen tiheä, tehdään mitoitus uudestaan ottamalla kitka huomioon. Kuvassa 39 on esitetty oikean pystysauman normaalivoimajakauma.

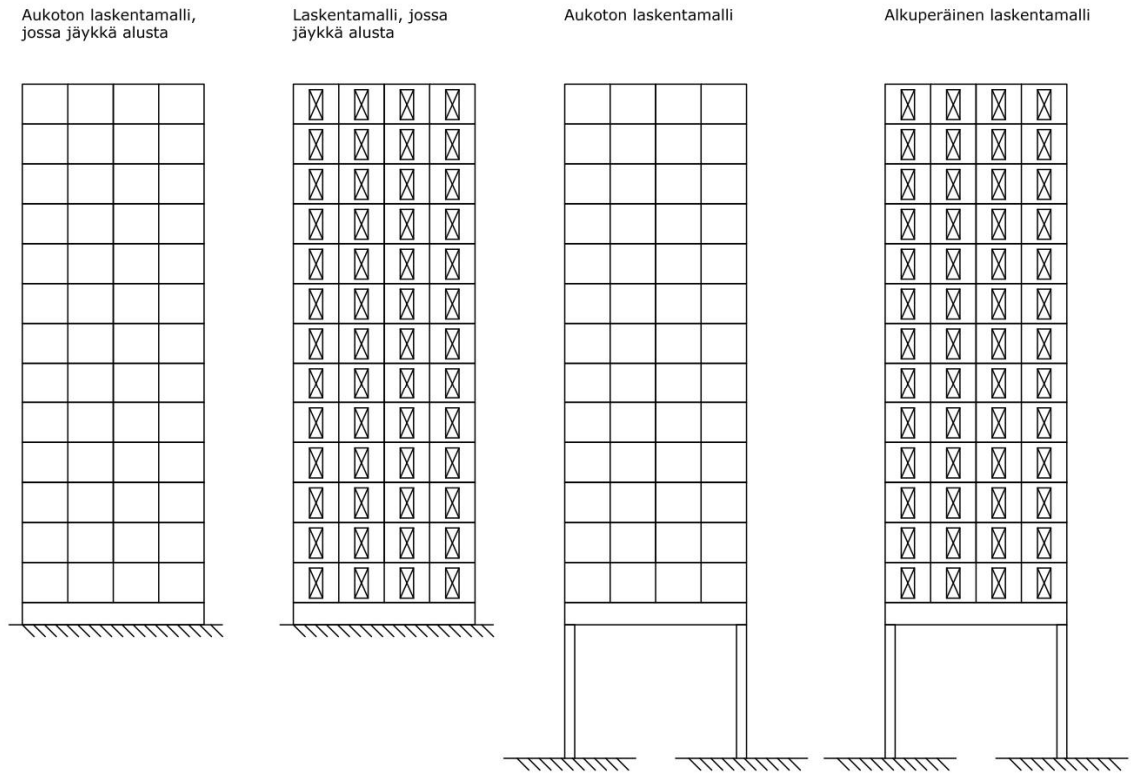


Kuva 39. Elementin V13 oikean pystysauman normaalivoimajakauma

Kuvasta 39 saadaan normaalivoiman keskiarvoksi 228 kN/m ja pienimmäksi normaalivoiman arvoksi 76,8 kN/m. Kun sauma mitoitettiin ottamalla kitka huomioon, saatiin liitososiksi T12 harjateräsenkit 230 mm jakovälillä.

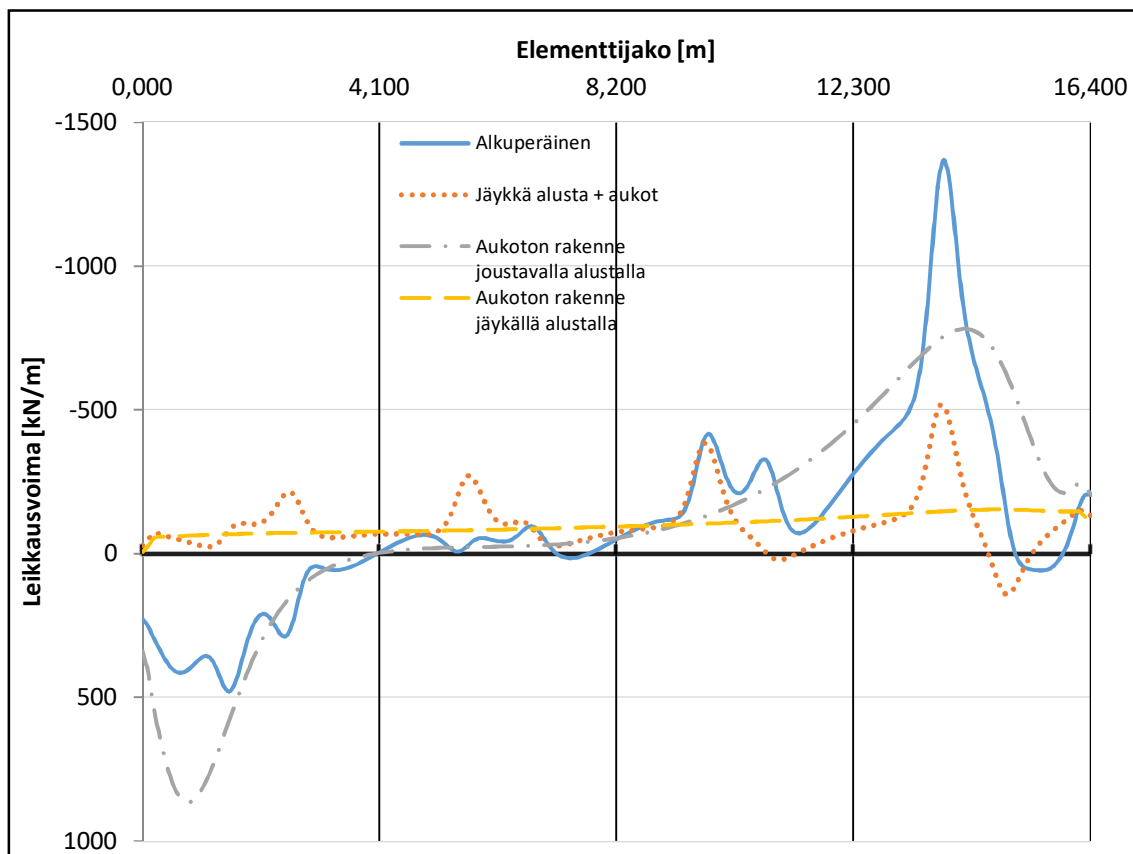
4.5.6 Laskentamallien vertailu

Tässä luvussa tutkitaan joustavan alustan sekä aukkojen merkitystä laskentatapauksen rakenteessa. Sitä varten on tehty kolme uutta laskentamallia. Ensimmäisestä on poistettu kaikki ikkuna-aukot ja asetettu alusta jäykäksi. Toisessa laskentamallissa on säilytetty aukot ja vaihdettu alusta jäykäksi. Kolmannessa vertailumallissa on poistettu aukot, mutta jätetty joustava alusta. Laskentamalleissa on käytetty samaa kuormitusyhdistelmää kuin aikaisemmin. Kuvassa 40 on esitetty käytetyt laskentamallit.



Kuva 40. Laskentamallit

Vertaillaan seuraavaksi edellä mainittujen laskentatapauksien normaali- ja leikkausjännityksiä tarkastelutasolla H1. Kuvassa 41 on esitetty leikkausvoimajakaumat alkuperäisessä tapauksessa sekä vertailumalleissa. Kuvan pystyakselit ovat asetettu niin, että jokainen pystyakseli osuu elementin reunaan.

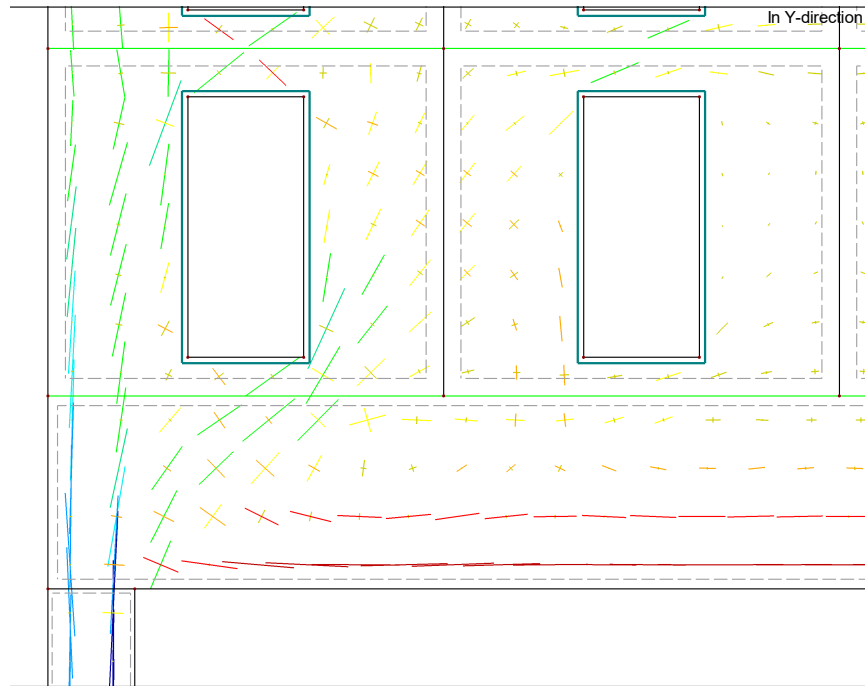


Kuva 41. Leikkausvoimajakaumien vertailu tasolla H1

Kuvasta 41 näkyy selvästi, että joustava alusta vaikuttaa merkittävästi leikkausvoimien jakaantumiseen tutkitulla tasolla. Kun alusta asetettiin jäykäksi, ei syntynyt yhtä suuria leikkausvoimapiikkejä, ja leikkausvoimaa on enimmäkseen vain yhteen suuntaan. Aukkojen vaikutus leikkausvoimajakaumaan näkyy myös selvästi, kun vertaillaan jäykällä alustalla olevia vertailumalleja. Aukkojen kohdalle muodostuu selvästi leikkausvoimapiikkejä. Suurin vaikutus leikkausjännitysjakaumaan on selvästi joustavalla alustalla.

Suurin maksimi-arvo leikkausjännitykselle saadaan alkuperäisessä tapauksessa. Maksimi-arvo muodostuu jokaisessa mallissa tuulen vaikutussuunnasta kauimpana olevaan elementtiin V14. Leikkausjännityksen minimi-arvo saadaan sen sijaan, kun alkuperäisestä mallista poistetaan aukot. Minimiarvot muodostuvat toiselle puolelle elementtiin V11 kaikissa tapauksissa paitsi mallissa, jossa on aukkoja ja alusta on jäykkä. Siinä leikkausjännityksen minimi-arvo muodostuu toiselle puolelle elementtiin V14.

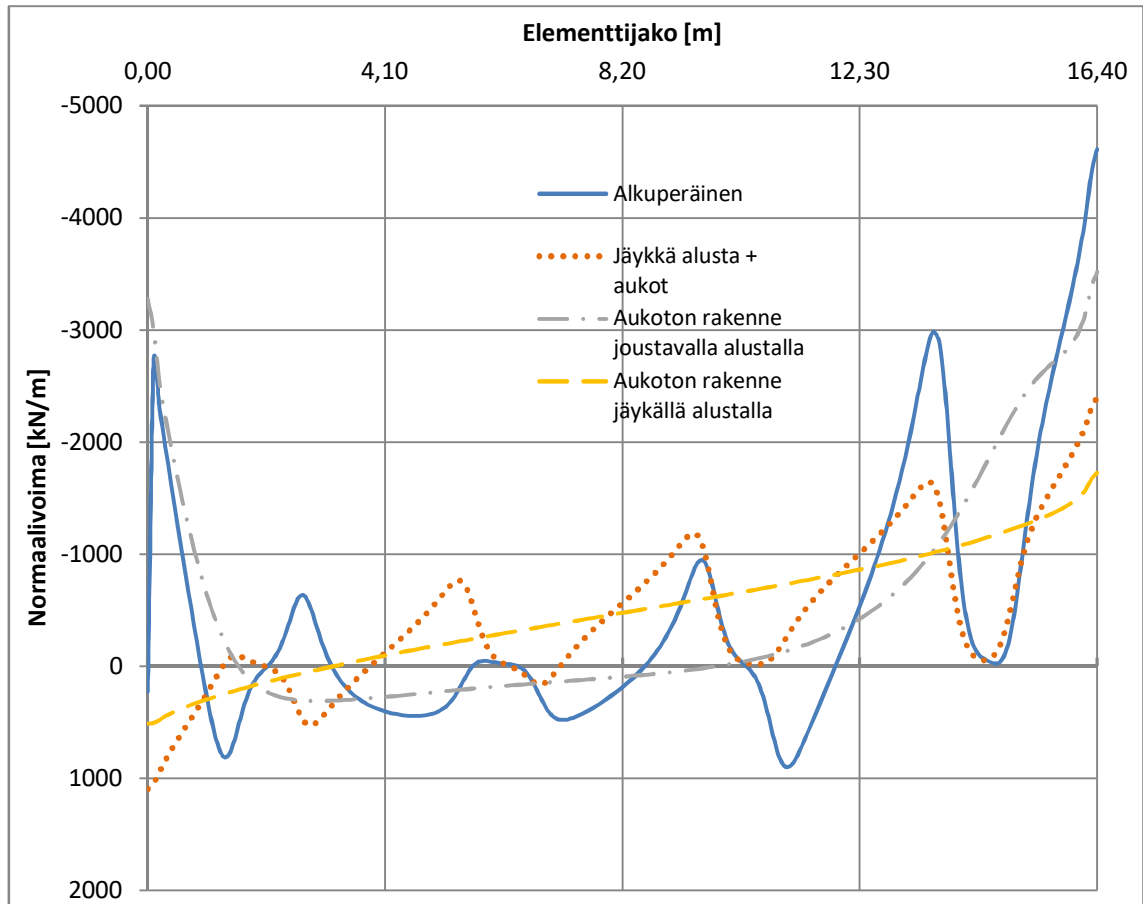
Jotta voidaan todeta, että pystykuormista aiheutuu leikkausvoimia saumoihin, tarkastellaan hieman pääjännityksiä. Kuvassa 42 on esitetty alkuperäisen laskentatapauksen pääjännitykset, niin että kuormana on vain rakenteiden omapaino. Kuvassa näkyy vain rakenteen alapään toinen puoli, koska pääjännitykset ovat tässä tapauksessa symmetrisiä seinän keskikohdan suhteen.



Kuva 42. Pääjännitykset alkuperäisessä tapauksessa

Kuvassa 42 näkyy selvästi, että pääjännityksen suunnat H1-tarkastelutasolla ovat hieman vinossa, mikä tarkoittaa sitä, että leikkausvoimaa muodostuu. Tässä kuormat ovat pelkästään pystysuuntaisia, joten voidaan todeta, että ne aiheuttavat leikkausvoimia elementtien saumoihin.

Seuraavaksi tarkastellaan mallien normaalivoimajakaumia. Kuvassa 43 on esitetty vertailumallien tason H1 normaalivoimajakaumat. Kuvan pysty akselit ovat asetettu niin, että jokainen pysty akseli osuu elementin reunaan.



Kuva 43. Normaalivoimajakaumien vertailu tasolla H1

Vertailemalla kuvaajia huomataan, että alustana toimivan palkin taipuma vaikuttaa merkittävästi tason H1 normaalivoimajakaumaan. Kun tarkastellaan siirtopalkin päällä olevien mallien käyriä, huomataan, että molemmilla tapauksilla molempiin ulkoreunoihin syntyy vahva puristusvyöhyke. Jäykällä alustalla olevat mallit ovat sen sijaan toisesta ulkoreunasta vedolla. Tästä voidaan päätellä, että palkin taipuminen aiheuttaa merkittävästi puristusjännitystä seinän molemmissa reunoissa.

Taulukosta 43 nähdään, jäykällä alustalla olevien mallien käyrät jokseenkin mukailevat toisiaan. Samalla tavalla toisiaan mukailevat jäykällä alustoilla olevien mallien käyrät. Eroja kuitenkin syntyy, koska aukottomien vertailumallien normaalivoimajakaumat ovat tasaisempia. Aukot siis aiheuttavat jakaumaan normaalijännityspiikkejä molempiin suuntiin.

Oletetusti suurimmat puristusjännitykset syntyvät jokaisessa mallissa reunimmaiseen elementtiin V14, koska vaakakuormat vaikuttavat vastakkaiselta sivulta ja aiheuttavat puristusta toiseen reunaan. Suurimmat vetojännitykset sen sijaan syntyvät jäykkäalustaisissa malleissa vaakakuormien puoleiseen reunaan elementtiin V11 ja siirtopalkillisissa malleissa seuraavaan elementtiin V12.

4.5.7 Yhteenveto

Vertailussa huomattiin, että vaikka tarkastelutasojen leikkaus- ja normaalivoimaresultantit olivat hyvin lähellä toisiaan, olivat elementtikohtaiset voimasuureet aivan eri luokkaa. Käsinelaskennassa leikkausvoimajakauma oli yksinkertainen ja leikkausvoimaa oli vain yhteen suuntaan. FEM-laskennassa leikkausvoimajakauma oli monimuotoisempi ja voimaa oli kahteen suuntaan.

Eri laskentamallien vertailussa huomattiin, että joustavana alustana toimiva palkki aiheutti merkittävästi puristusta tarkastelutason H1 ulkoreunoihin. Aukot aiheuttivat jännityspiikkejä leikkaus- ja normaalijännitysjakauksiin. Siirtopalkin taipuma siirtää vetojännityksiä keskemmälle ja aiheuttaa molempiin reunoihin puristusta. Tämä selittyy siten, että palkki taipuu alas keskeltä aiheuttaen vetoa sinne ja nousee reunoilta aiheuttaen puristusta reunoihin. Toisaalta molempiin reunaelementteihin muodostui myös suuret leikkausvoimavyöhykkeet, jolloin kitkaa voidaan käyttää kumoamaan suuria leikkausvoimia.

Vetotarkastelu käsin tehtynä elementtikohtaisesti erosi FEM-laskennasta suuresti. Tämä oli toisaalta odotettavaa, sillä käsinelaskennassa ei otettu huomioon aukkoja eikä siirtopalkin joustavuutta. FEM-laskennassa suurin vetoresultantti syntyi elementtiin V12, mutta käsinelaskennassa suurin ja ainoa vetovyöhyke syntyi reunimmaiseen V11 elementtiin.

Kitkan vaikutusta tarkasteltiin H1-tarkastelutason normaalivoimaresultanttien avulla. Tällöin kitkavoima pystyi siirtämään kaiken leikkausvoiman. Tulos on kuitenkin epävarma, koska jos kitkavoimaa tarkastellaan elementtikohtaisesti, ei sitä välttämättä synny. Sillä jos elementti on täysin vedetty, ei synny kitkavoimaa synnyttävää puristusta. Sen vuoksi jos kitkavoimaa käytetään elementtien vaakaliitoksen mitoituksessa, tulisi tarkastelu tehdä elementin oman normaalivoimajakauman mukaisesti. Kitkatarkasteluja ei siis tule tehdä käsinelaskennan mukaisilla arvoilla.

Elementin V13 liitokset mitoitettiin yhdellä kuormitusyhdistelmällä FEM-laskennasta. Leikkauskapasiteetti vaakaliitoksessa laskettiin CEB-mallinormin mukaisesti. Pystysauman mitoitus sen sijaan tehtiin Eurokoodin mukaisesti työsauman leikkauskestävyyden kaavalla. Pystysauman teräslenkkien jako määritettiin laskennallisesti. Toisen sauman jakoväliksi saatiin 230 mm, joka on todella tiheä ja aiheuttaisi todennäköisesti ongelmia asennuksessa.

Elementin V13 liitosten mitoituksessa käytettiin kitkan vaikutusta hyväksi. Kitkatarkastelu tehtiin vaakasaumalle kitkakertoimella 0,5 ja liikekitkakertoimella 0,27. Pystysaumassa kitkakertoimeksi valittiin Eurokoodin mukainen arvo 0,9. Kitkan avulla saatiin vaarnatappien määrää vähennettyä liitoksessa sekä pystysauman teräslenkkien jakoväliä kasvatettua.

Lyhyiden vaarnatappien määrää elementissä V13 voidaan myös vähentää siten, että käytetään mitoituksessa hyväksi pystysaumassa kulkevia saumateräksiä tai sijoitetaan pystysaumaan erillisiä vaarnatappeja. Kyseiset tapit voidaan mitoittaa Eurokoodin työsauman leikkauskestävyyden kaavalla tai Rasmussenin ja Pruijerssin vaarnatappikaavalla, koska tapit saadaan helposti ankkuroitua molemmin puolin vaakasaumaa.

Elementin V13 leikkausvoimajakaumassa oli leikkausvyöhykkeitä kahteen eri suuntaan, mikä toi haastetta mitoitusvoiman määrittämiselle. Koska toisen puolen leikkausvoimavyöhyke oli paljon suurempi, käytettiin mitoittavana leikkausvoimana jakauman keskiarvoa. Leikkausvoimapiikkien oikeanlaisesta käsittelystä ei löytynyt tietoa. Laskuissa huomattiin, että koko tarkastelutason leikkausvoimaresultantilla ei voitu tehdä mitoitusta, koska elementit mitoitettiin elementtikohtaisten leikkausvoimajakaumien mukaisesti. Tällöin siirrettävää leikkausvoimaa muodostui enemmän kuin pelkästään tason leikkausvoimaresultantista.

5. SEINÄELEMENTTIENTEN VAAKASAUMAN MITOITUSOHJE

Kuormien määrittelyn jälkeen määritetään seinäelementtien vaakasauman mitoittava rasitus. Mitoituksessa käytettävä kuormitusyhdistelmä on myös valittava tarkasti. Esimerkiksi vierekkäisten elementtien vaakasaumojen mitoituksissa voi olla käytössä kaksi eri kuormitusyhdistelmää.

Monimutkaisissa rakenteissa käsinlaskenta on huono työkalu mitoittavien voimien määrittämiseen. Yksinkertaisissa rakenteissa voidaan kuitenkin käyttää käsinlaskennan arvoja mitoituksessa. Monimutkaisistakin rakenteista voidaan suhteellisen nopeasti tehdä FEM-ohjelmalla kuorimalli ja laskea rasitukset saumojen kohdissa. FEM-mallinnuksessa pitää kiinnittää erityistä huomiota oikeanlaisten tukien mallintamiseen, jotta tuloksista saadaan luotettavia.

Varsinaisen vaakaliitoksen mitoituksen kannalta olennaisinta on päättää mitä liitososia käytetään, eli miten voimat siirretään. Vaakasaumassa vetovoimat siirretään tavallisesti seinäkenkien ja niihin sopivien pulttien avulla. Ne sijoitetaan elementtien reuna-alueille, vaikka vetovyöhykkeet eivät aina sijaitse reunoilla. Vetovoimaresultantit haetaan jokaisesta vetovyöhykkeestä erikseen. Saatujen resultanttien perusteella valitaan liitososat valmistajien taulukoista.

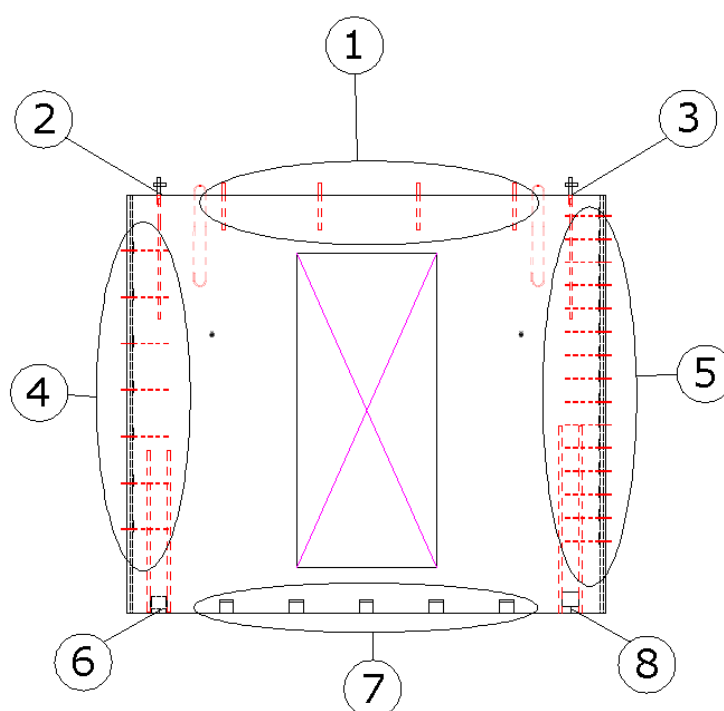
Mitoittavat leikkausvoimat vaakasaumassa saadaan yleensä leikkausvoimajakauman resultanttiarvosta. Kuitenkin, jos leikkausvoimajakaumassa on negatiivisia ja positiivisia arvoja, tai jos jakaumassa on korkeita piikkejä, kannattaa leikkausvoimaresultantti määrittää mahdollisimman konservatiivisesti. Leikkausvoiman siirtämiseen käytetään tyypillisesti lyhyitä vaarnatappeja, mutta voidaan käyttää muitakin vaihtoehtoja. Vaarnatapit voidaan ankkuroida molempiin elementteihin, jolloin saavutetaan hieman isompi leikkauskestävyys. Pystysaumaan voi sijoittaa leikkausta siirtäviä teräksiä, jos se on mahdollista. Pystysaumaan sijoitetut vaarnatapit on helppo asentaa työmaalla ja niillä on suurempi leikkauskapasiteetti kuin lyhyillä tapeilla, koska ne voidaan ankkuroida leikkausmurtopinnan molemmille puolille.

Toinen tärkeä asia on kitkan huomiointi. Kuten työn toisessa laskentatapauksessa huomattiin, kasvoivat leikkausvoimat suuriksi reunimmaisissa elementeissä. Kun kitka otettiin mukaan mitoitukseseen, saatiin vaarnatapeilla siirrettävää leikkausvoimaa pienennettyä suuresti ja tarvittavien tappien määrä vähentyi oleellisesti. Kun kitka huomioidaan, on pinnoille valittava sopiva kitkakerroin. Tässä työssä mallielementin mitoituksessa käytettiin liikekitkakerrointa 0,27. Eurokoodin mukaan saisi käyttää myös arvoa 0,5. Jos kitkaa käytetään hyväksi, on se syytä miettiä riskitekijöitä. Elementtien asennuksessa käytetyt

asennuspalat saattavat vaikuttaa kitkan muodostumiseen, jos ne jäävät paikoilleen. Lisäksi liitospintojen laadulla sekä saumavalun onnistumisella on merkittävä vaikutus kitkan muodostumisen kannalta.

5.1 Mallielementin liitosten mitoitus

Laskentatapauksesta valittiin mallielementiksi V13. Mitoitukseen on otettu mukaan vaakasaumojen lisäksi myös pystysaumot, koska niiden mitoitus on hyvin samankaltaista. Mallielementin liitosten mitoitus käydään tässä läpi kuvan 44 mukaisen numerojaottelun mukaan.



Kuva 44. Elementti V13

Taulukossa 11 kerrotaan, miten leikkausvoimat siirretään elementin molemmissa vaakaliitoksissa. Liitososina käytettiin lyhyitä 32 mm vaarnatappeja. Alempaan liitokseen mitoitettiin 5 tappia ja ylem্পään 4, kun huomioitiin kitkan vaikutus. Tappien mitoitus tehtiin kaavalla 7, joka on CEB-mallinormin kaava lyhyille vaarnatapeille. Lyhyen vaarnatappiliitoksen liitosdetalji on esitetty liitteessä D.

Taulukko 11. Lyhyiden vaarnatappiliitosten mitoitus

LIITOS 1: Lyhyet vaarnatapit
Mitoittava leikkausvoima määritettiin leikkausjännitys jakauman keskiarvon avulla. Mitoittavaksi voimaksi saatiin 954,4 kN.
Liitoksen mitoituksessa otettiin kitka huomioon. Puristavaksi normaali-voimaksi saatiin 1304,4 kN. Kitkakertoimena käytettiin liikekitkakerrointa 0,27.
Vaarnatapin leikkauskestävyys laskettiin CEB-mallinormin mukaisella kaavalla lyhyille vaarnatapeille. Liitososiksi saatiin neljä 32 mm terästä.
Terästen ankkurointi pituus täytyy olla suurempi kuin 8Φ. Käytetään TW32 tappeja ja pituutena 500mm.
Tapit tulevat 130 mm ulos elementistä.
LIITOS 7: Lyhyet vaarnatapit
Mitoittava leikkausvoima määritettiin leikkausjännitys jakauman keskiarvon avulla. Mitoittavaksi voimaksi saatiin 770,6 kN.
Liitoksen mitoituksessa otettiin kitka huomioon. Elementin normaalijännitys jakaumassa oli sekä vetoa että puristusta. Puristavaksi normaalivoimaksi valittiin puristusvyöhykkeen resultantti 730,6 kN. Kitkakertoimena käytettiin liikekitkakerrointa 0,27.
Vaarnatapin leikkauskestävyys laskettiin CEB-mallinormin mukaisella kaavalla lyhyille vaarnatapeille. Liitososiksi saatiin viisi 32 mm terästä.
Terästen ankkurointi pituus täytyy olla suurempi kuin 8Φ. Käytetään TW32 tappeja ja pituutena 500mm.
Tappien kohdille tehtiin elementtiin kolot.

Taulukossa 12 on esitetty V13-elementin molempien pystysaumojen mitoituksen tiedot. Molemmissa liitoksissa käytettiin betonivaarnattua harjateräslenkki-liitosta. Mitoitus tehtiin kaavalla 3, joka on Eurokoodin kaava työsauman leikkauskestävyydelle. Kitka huomioitiin liitoksessa 4, koska siinä leikkausrasitus oli suuri. Toisessa liitoksessa kitkaa ei huomioitu. Pystysauman liitosdetalji on esitetty liitteessä D.

Taulukko 12. Pystysaumojen mitoitus

LIITOS 4: Betonivaarnat ja harjateräslenkit
Mitoittava leikkausvuo määritettiin leikkausjännitys jakauman keskiarvon avulla. Mitoittavaksi leikkausvuon arvoksi saatiin 538,9 kN/m.
Liitoksen mitoituksessa otettiin kitka huomioon. Kitkan laskennassa käytettiin normaalijännitys jakauman pienintä arvoa, 76,8 kN/m. Kitkakertoimena käytettiin Eurokoodin mukaista arvoa vaarnatulle työsaumalle, joka on 0,9.
Liitoksen mitoitus tehtiin Eurokoodin työsauman leikkauskestävyyden kaavalla vaarnatun työsauman mukaisesti. Liitoksessa käytettiin 120 mm leveitä betonivaarnoja.
Teräsosiksi saatiin T12 harjateräslenkit 230 mm jaolla.
Teräksset tulevat 120 mm ulos elementistä.
LIITOS 5: Betonivaarnat ja harjateräslenkit
Mitoittava leikkausvuo määritettiin leikkausjännitys jakauman keskiarvon avulla. Mitoittavaksi leikkausvuon arvoksi saatiin 167,2 kN/m.
Liitoksen mitoituksessa ei huomioitu kitkaa, koska rasitus ei ollut suuri.
Liitoksen mitoitus tehtiin Eurokoodin työsauman leikkauskestävyyden kaavalla vaarnatun työsauman mukaisesti. Liitoksessa käytettiin 120 mm leveitä betonivaarnoja.
Teräsosiksi saatiin T8 harjateräslenkit 500 mm jaolla.
Teräksset tulevat 120 mm ulos elementistä.

Seuraavaksi käydään läpi seinäkengillä ja pulteilla toteutettavat liitokset. Niiden mitoitus on esitetty taulukossa 13. Ylempään vaakasaumaan ei syntynyt vetojännitystä, joten vetoa siirtäviä liitososia ei tarvittaisi siellä. Liitosten 2 ja 3 pulttien tarkoitus on helpottaa elementin asennusta. Liitoksien 6 ja 8 seinäkengät mitoitettiin omien vetovyöhykkeiden vetoresultanteille. Käytetyn liitoksen detalji on esitetty liitteessä D.

Taulukko 13. Pulttiliitosten mitoitus

LIITOS 2 & 3: Seinäkenkä-pultti -liitos
Elementin ylempi vaakasauma oli täysin puristettu.
Pulttien tarkoitus kyseisissä liitoksissa on helpottaa elementtien asennusta.
LIITOS 6: Seinäkenkä-pultti -liitos
Mitoitettiin vetovyöhykkeen resultanttivoimalle, joka oli 38,9 kN.
Liitoksen vetokapasiteetti katsottiin erään valmistajan taulukosta.
Valittiin 16 mm pultti ja sille sopiva seinäkenkä.
Seinäkengän sijoituksessa on tarkastettava liitoksen minimietäisyydet ja seinän minimipaksuus liitokselle. Raja-arvot saadaan valmistajien taulukoista.
LIITOS 8: Seinäkenkä-pultti -liitos
Mitoitettiin vetovyöhykkeen resultanttivoimalle, joka oli 724,8 kN.
Liitoksen vetokapasiteetti katsottiin erään valmistajan taulukosta.
Valittiin 45 mm pultti ja sille sopiva seinäkenkä.
Seinäkengän sijoituksessa on tarkastettava liitoksen minimietäisyydet ja seinän minimipaksuus liitokselle. Raja-arvot saadaan valmistajien taulukoista.

6. YHTEENVETO

Lähtökohtana seinäelementin saumojen mitoituksessa on, että rasitusjakaumat määritetään elementtikohtaisesti. Jos rakenneanalyysin avulla määritetyissä jännitysjakauksissa on paljon piikkejä, saattaa mitoitusvoiman määrittäminen olla haastavaa. Erityisesti leikkausvoimapiikit leikkausjännitysjakauksissa aiheuttavat haasteita, koska niiden huomioon ottamisesta ei löytynyt tietoa. Toisaalta vaarnatappiliitos vaatii toimiakseen sauman suuntaisen siirtymän saumassa toimiakseen, jolloin leikkausvoimat todennäköisesti jakautuvat jännityspiikin lähellä oleville tapeille.

Esimerkitapauksessa eroja käsinlaskennan ja FEM-laskennan välillä syntyi vaakakuormien jakaantumisen suhteen. Erot eivät kuitenkaan olleet suuria. Tällöin käsinlaskenta soveltui hyvin FEM-tulosten suuruusluokan tarkistamiseen.

Laskentatapauksessa yksinkertaisen käsinlaskennan tulokset odotetusti erosivat merkittävästi FEM-laskennan tuloksista, kun tarkasteltiin elementtikohtaisia rasitusjakauksia. Käsinlaskennassa tässä tapauksessa tehtiin niin suuria idealisointeja, jotta laskenta pysyi yksinkertaisena, että tulokset eivät vastanneet todellisuutta. Tuloksista voidaan vetää johtopäätös, että yksinkertainen käsinlaskenta ei soveltunut kyseiseen laskentatapaukseen. Sen sijaan ensimmäisessä laskentatapauksessa rakenne oli tarpeeksi yksinkertainen, jolloin yksinkertaisilla käsinlaskentamenetelmillä päästiin FEM-laskennan tulosten lähelle.

Monimutkaisemmilla käsinlaskentamenetelmillä päästäisiin varmasti lähemmäksi FEM-laskennan tuloksia. Laskentaan voidaan käyttää esimerkiksi Lewickin tai Rosmanin menetelmää, mutta laskentatehtävä olisi tällöin moninkertaisesti työlämpi. Käsinlaskenta ei siis aina sovellu FEM-laskennan tarkastamiseen. Tarkastamiseen voidaan sen sijaan käyttää esimerkiksi toista FEM-ohjelmaa.

Laskentamallien vertailussa nostettiin esiin pystykuormien vaikutus vaakasaumojen leikkausjännitysjakaukseen ja sitä kautta myös vaakaliitoksen mitoitukseen. Kun rakennetta kuormitettiin ainoastaan pystysuuntaisilla kuormilla, huomattiin että pääjännitykset tuen lähellä olivat selvästi vinoja, eli aiheuttivat leikkausvoimaa saumaan. Laskentamallien leikkausjännitysjakauksien vertailussa huomattiin myös, että leikkausvoima jakaumat olivat täysin erimuotoisia, kun alusta oli joustava.

Kitkan huomiointi vaakaliitoksen leikkauskapasiteetissa paransi leikkauskestävyyttä huomattavasti. Kitkan käyttämisessä piilee kuitenkin riskinsä, koska elementtien asennuksessa käytettävät asennuspalat, tukipinnan huono laatu tai huolimaton asennus saattavat vähentää kitkan vaikutusta merkittävästi.

6.1 Pohdinta

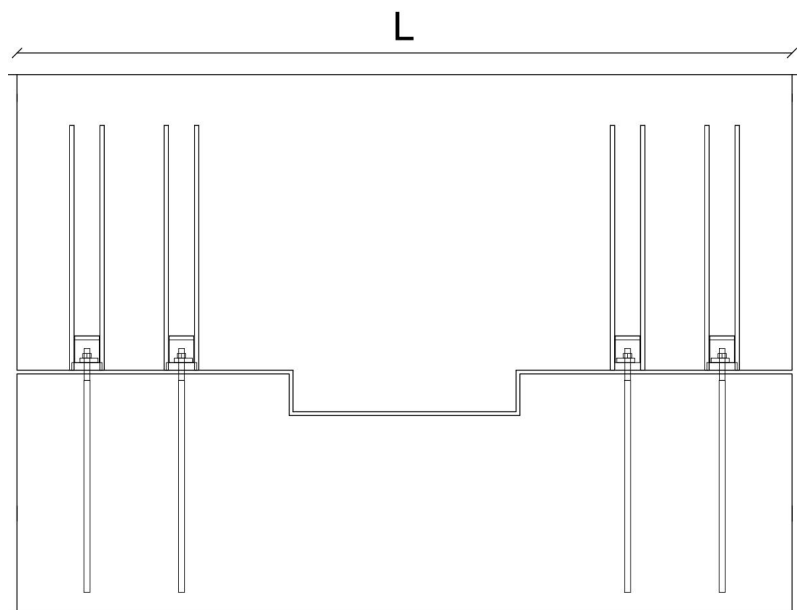
Vaakasauman leikkauskapasiteetin tarkastelussa huomattiin, että lyhyiden vaarnatapppien täyden leikkauskapasiteetin saavuttamiseksi pitää saumassa tapahtua sauman suuntaista siirtymää. Usein lyhyiden vaarnatapppien kanssa käytetään liitoksessa seinäkenkiä ja pultteja, joilla voidaan siirtää liitokseen syntyvät vetovoimat. Vaikka seinäkenkien valmistajat eivät anna tuotteilleen leikkauskapasiteettia, on selvää että, jos liitoksessa tapahtuu siirtymää, siirtää myös seinäkenkeliitos leikkausvoimia. Voidaan siis sanoa, että seinäkenkien käyttäminen vaakasaumassa lisää varmuutta leikkaustarkastelun suhteen.

Leikkauspiikkien oikeanlaisesta käsittelystä mitoituksessa ei löytynyt tietoa. Jotta vaarnatapppien leikkauskapasiteetti saadaan käytettyä, pitää saumassa tapahtua pintojen välistä siirtymää. Tällöin betoniin tulee sauman suuntainen halkeama, jota FEM-laskenta ei ota huomioon. Sen vuoksi, kun sauma on haljennut, on todellinen leikkausvuo erilainen verrattuna FEM-laskennan tuloksiin. Kun saumassa tapahtuu siirtymää, altistuvat kaikki vaarnatapid samalle siirtymälle, jolloin kuorma jakautunee tapeille ja leikkausvoimapiikit todennäköisesti tasoittuvat. Joka tapauksessa leikkausvoimapiikkien tarkempi tutkiminen olisi hyvä jatkotutkimuskohde.

Elementtirakenteisten jäykistysrakenteiden, kuten leikkausseinien, siirtymät eivät tavallisesti ole mitoittavia tekijöitä. On kuitenkin huomattava, että lyhyiden vaarnatapppien täyden leikkauskapasiteetin vaatima siirtymä lisää myös jäykistävän rakenteen kokonaissiirtymää. Tätä kyseistä siirtymää ei tavallisesti oteta huomioon kokonaissiirtymien laskennassa. Teoriassa siis 10-kerroksisessa rakennuksessa siirtymän lisäys voisi olla jopa 32 mm, jos käytetään 32 mm vaarnatappeja.

6.2 Jatkotutkimustarpeet

Lyhyitä vaarnatappeja on käytetty vaakaliitoksessa jo pitkään eikä vartenotettavaa yhtä vakioitua vaihtoehtoa tälle ole esitetty. Luvussa 3.3 esitettiin kaksi vaihtoehtoista liitostyyppiä vaarnatappiliitokselle. Ensimmäistä liitosvaihtoehtoa hieman soveltamalla saadaan kuvan 45 mukainen lovimainen liitos.



Kuva 45. Vaakaliitosehdotus

Liitoksen vetovoimat otetaan vastaan tyypillisillä seinäkengillä ja pulteilla toteutetuilla liitoksilla. Nämä liitoksen sijaitsevat elementtien reuna-alueilla niin kuin tavallisestikin.

Elementeissä olevat ulokkeet siirtäisivät leikkausvoimia vaakaliitoksessa konsolin tavoin. Kuvan 45 alemmassa elementissä toiselle konsolille välittyy vain toisen suunnan vaakakuormat. Toisin sanoen, jos tuulee oikealta vasemmalle, välittyy kaikki leikkausvoima alemman elementin oikeanpuoleiselle konsolille. Leikkausvoimia saataisiin siirrettyä myös hieman tasaisemmin, jos konsoleita olisi esimerkiksi kaksi.

Ensimmäisen laskentatapauksen alimpaan vaakasaumaan saatiin leikkausresultantiksi 734 kN. Jos käytettäisiin kuvan 45 mukaista liitosta 150 mm korkealla konsolilla, saataisiin puristavaksi jännitykseksi konsoleiden liittymäpintaan 20,4 MPa. Saatu puristusjännitys on hyvinkin kohtuullinen. Ulokkeiden raudoitukset voitaisiin laskea esimerkiksi ristikkoanalyysin avulla.

Kyseinen liitos olisi huomattavan yksinkertainen, eikä siinä tarvittaisi vaarnatappeja. Asentaminen olisi myös helpompaa. Kyseisen liitoksen tutkiminen olisi varmasti hyödyllinen jatkotutkimuskohde tälle diplomityölle. Liitoksen toimintaa ja sopivuutta voitaisiin tutkia yhden elementin ja useamman elementin levyisissä jäykistävässä seinärakenteissa.

LÄHTEET

- Alkatan, J. (2016). FRP Shear Transfer Reinforcement for Composite Concrete Construction, University of Windsor.
- BES (2010). Jäykistysjärjestelmät, Betoniteollisuus Ry, websivu. Saatavissa: <http://www.elementtisuunnittelu.fi/fi/rakennejarjestelmat/rakennuksen-jaykistys/jaykistysjarjestelmat>, viitattu 15.12.2017.
- Elliot, K.S. & Jolly, C.K. (2013). Multi-storey precast concrete framed structures 2. edition, Chichester: Wiley-Blackwell.
- Friction: Coefficient, Applications, Advantages and Disadvantages, ME Mechanical Team. Saatavissa: <https://me-mechanicalengineering.com/friction-coefficient-applications-advantages-disadvantages/>, viitattu 8.3.2018.
- Hokkanen, S. (2016). Betonirakenteiden stabiliteettilaskelmat Eurokoodin mukaan, diplomityö, Tampereen teknillinen yliopisto, 213 s. Saatavissa: <https://dspace.cc.tut.fi/dpub/handle/123456789/24453>
- Kiviluoma, R. (2007). Suomen korkeimman rakennuksen turvalliset rakennusratkaisut: tuulen vaikutus. Rakentajain kalenteri 2007, Rakennustieto Oy, Helsinki 2006, s.461-463.
- Leskelä, M.V. (2008). BY 210: Betonirakenteiden suunnittelu ja mitoitus 2008, Suomen Betoniyhdistys, Helsinki.
- Mäkinen, P. (2016). Korkeiden rakennusten EN-standardien mukainen suunnittelu, Diplomityö, Tampereen teknillinen yliopisto.
- Paulay, T., Park, R. & Phillips, M.H. (1974). Horizontal Construction Joints in Cast-in Place Reinforced Concrete, ACI Publication, Vol 42, s.599-616.
- PCI, 2004. (2004). PCI Design Handbook: Precast and Prestressed Concrete, 6. edition, Precast Concrete Institute, Chicago.
- Randl, N. (2007). Load Bearing Behaviour of Cast-in Shear Dowels, Beton- und Stahlbetonbau, Vol 102(S1), s.21-37.
- Randl, N. (2013). Design recommendations for interface shear transfer in fib Model Code 2010, Structural Concrete, Vol 14(3), s.230-241.

Roylance, D. (2000). Stresses in beams, Massachusetts Institute of Technology, Saatavissa: https://ocw.mit.edu/courses/materials-science-and-engineering/3-11-mechanics-of-materials-fall-1999/modules/MIT3_11F99_bstress.pdf

RTT (1995). Valmisosarakentaminen: 2, RTT Rakennusteollisuus ry, Helsinki.

Santos, P.M.D., Júlio E.N.B.S. (2009). Assessment of the Shear Strength between Concrete Layers, University of Coimbra. Saatavissa: [http://www.civil.ist.utl.pt/~cris-tina/RREst/Aulas_Apresentacoes/07_Bibliografia/beatao%20novo%20\(concrete%20overlay\)/PhD_thesis_PSanatos.pdf](http://www.civil.ist.utl.pt/~cris-tina/RREst/Aulas_Apresentacoes/07_Bibliografia/beatao%20novo%20(concrete%20overlay)/PhD_thesis_PSanatos.pdf)

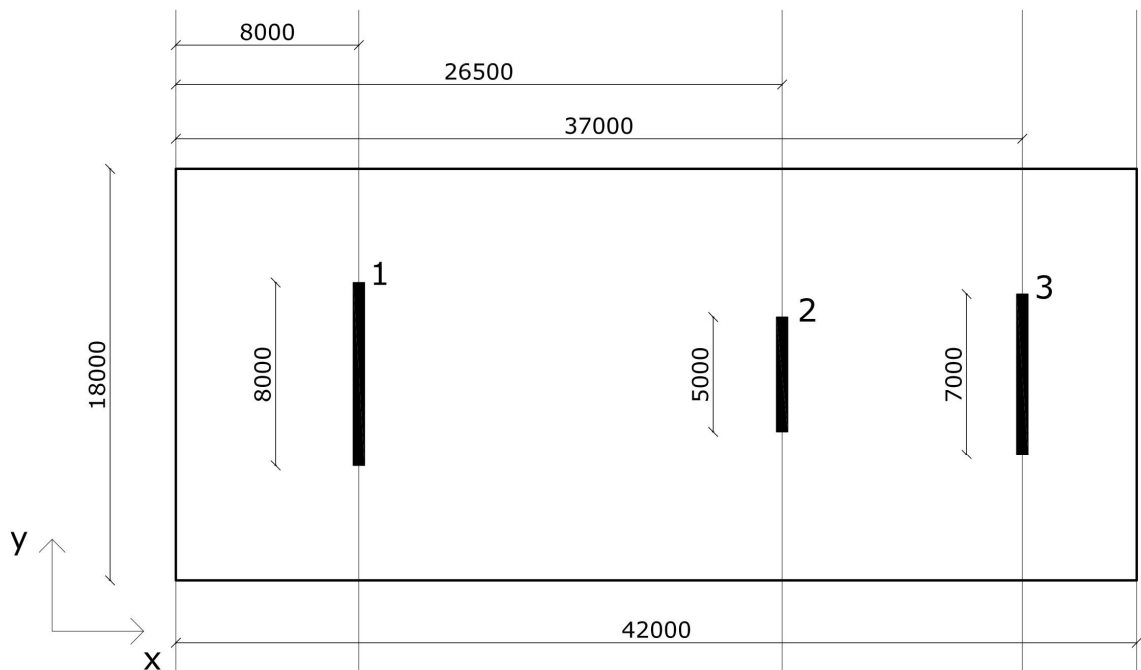
Santos, P.M.D., Júlio E.N.B.S. (2012). A state-of-the-art review on shear-friction, Engineering Structures, Vol 45, s.435-448.

SFS-EN 1992-1-1 (2015). Eurokoodi 2: Betonirakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt, Suomen standardisoimisliitto, Helsinki.

Taranath, B.S. (2010). Reinforced concrete design of tall buildings, CRC Press.

The 2016 Code: Code of Practice for Precast Concrete Construction 2016 (2016). The Buildings Department.

LIITE A: ESIMERKKILASKELMAT 8-KERROKSISSA TOIMIS-TOTALOSSA.



kuormitusleveys	L [m]	42
jäykkyysskeskipiste	X [m]	20,50969388
epäkeskisyys	e [m]	0,490306122

Seinä nro	paksuus [m]	pituus [m]	I [m ⁴]	x [m]	I*x	a= x-X [m]
1	0,24	8	10,24	8	81,9	12,51
2	0,24	5	2,5	26,5	66,3	5,99
3	0,24	7	6,86	37	254	16,49
yht			19,6		402	

I*a	I*a ²	Seinän ottama osuus kokonaisvoimasta [%]
128,099	1602,483	54,01
14,976	89,709	12,55
113,124	1865,441	33,44
	3557,633	100

Seinän 1 kuormat

kerros lukumäärä	$n := 8$
kerros korkeus	$h := 3.5\text{m}$
Rakennuksen sivujen mitat	$B := 42\text{m}$
	$H := 18\text{m}$

Kuormitusyhdistelmänä on seuraava: $0,9 \cdot \text{pysyvät kuormat} + 1,15 \cdot \text{lisävaakavoima} + 1,5 \cdot \text{tuulikuorma}$

Pystykuormat

Seinän 1 kuormitusala	$A := 8\text{m} \cdot 8\text{m} = 64\text{m}^2$
Omat painot yhdeltä kerrokselta	
Seinän 1 paino /krs	$g_1 := 8\text{m} \cdot h \cdot 0.24\text{m} \cdot 25 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} = 168 \cdot \text{kN}$
Välipohjan omapaino seinälle 1 /krs	$g_2 := A \cdot 4 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} = 256 \cdot \text{kN}$
Seinien omapaino /krs (seiniä yhteensä 30 jm)	$g_3 := 3.5\text{m} \cdot 0.24\text{m} \cdot 30\text{m} \cdot 25 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} = 630 \cdot \text{kN}$
	$g_{\text{kok}} := g_1 + g_2 = 424 \cdot \text{kN}$
	$g_{\text{d.kok}} := 0.9 \cdot g_{\text{kok}} = 381.6 \cdot \text{kN}$

Vaakakuormat

Tuuli:	$F_w := 0.9 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$
yhdelle kerrokselle	$F_h := F_w \cdot 3.5\text{m} \cdot 42\text{m} = 132.3 \cdot \text{kN}$
	$F_l := \frac{(B \cdot H) \cdot 4 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} + g_3}{150} = 24.36 \cdot \text{kN}$
Lisävaakavoima /krs	
Kokonaisvaakavoima /krs:	$H_d := 1.5 \cdot F_h + 1.15 \cdot F_l = 226.464 \cdot \text{kN}$

Seinä 1					
krs	Leikkausvoima [kN]	Momentti [kNm]	Puristusresultantti [kN]	Puristusjännitys σ_1 [MPa]	Taivutusvastus W [m ³]
8	122,31	214,05	381,6	0,19875	2,56
7	244,63	856,20	763,2	0,3975	2,56
6	366,94	1926,45	1144,8	0,59625	2,56
5	489,26	3424,79	1526,4	0,795	2,56
4	611,57	5351,24	1908	0,99375	2,56
3	733,88	7705,78	2289,6	1,1925	2,56
2	856,20	10488,42	2671,2	1,39125	2,56

1	978,51	13699,16	3052,8	1,59	2,56
---	--------	----------	--------	------	------

kr	Vetojännitys taivutuksesta seinän vedetyssä reunassa [MPa]	Yhdistetty jännitys seinän vedetyssä reunassa [MPa]	Vetovyöhykkeen leveys [m]	Vetoresultantti [kN]
8	0,08	-0,115	-5,51	
7	0,33	-0,063	-0,75	
6	0,75	0,156	0,83	15,58
5	1,34	0,543	1,62	105,72
4	2,09	1,097	2,10	276,12
3	3,01	1,818	2,42	526,80
2	4,10	2,706	2,64	857,75
1	5,35	3,761	2,81	1268,96

Kitkatarkastelu					
kr	Leikkausvoima [kN]	Puristus [kN]	Kitkavoima [kN] $\mu=0,5$	Kitkavoima [kN] $\mu=0,27$	Liitinosille jäävä osuus [kN], kun $\mu=0,27$
8	122,3	381,6	190,8	103,0	19,3
7	244,6	763,2	381,6	206,1	38,6
6	366,9	1144,8	572,4	309,1	57,8
5	489,3	1526,4	763,2	412,1	77,1
4	611,6	1908	954	515,2	96,4
3	733,9	2289,6	1144,8	618,2	115,7
2	856,2	2671,2	1335,6	721,2	135,0
1	978,5	3052,8	1526,4	824,3	154,3

LIITE B: MALLIKOHTEN RASITUSTEN KÄSINLASKENTA

Päätyseinän kuormat

kerros lukumäärä

$$n := 13$$

kerros korkeus

$$h := 3.6\text{m}$$

Rakennuksen sivujen mitat

$$B := 38\text{m}$$

$$H := 16.4\text{m}$$

Pystykuormat

Seinän 1 kuormitusala

$$A := H \cdot 5\text{m} = 82\text{m}^2$$

Omat painot yhdeltä kerrokselta

Seinän paino /krs

$$g_s := H \cdot h \cdot 0.24\text{m} \cdot 25 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} = 354.24 \cdot \text{kN}$$

$$A_{\text{aukot}} := 4 \cdot 1200\text{mm} \cdot 2700\text{mm} = 12.96\text{m}^2$$

$$A_{\text{seinä}} := H \cdot h - A_{\text{aukot}}$$

$$g_1 := A_{\text{seinä}} \cdot 0.24\text{m} \cdot 25 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} = 276.48 \cdot \text{kN}$$

Välipohjalta omapaino seinälle /krs

$$g_2 := A \cdot 4 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} = 328 \cdot \text{kN} \quad \frac{g_2}{H} = 20 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Omat painot yhteensä

$$g_{\text{kok}} := g_1 + g_2 = 604.48 \cdot \text{kN}$$

$$g_{\text{d.kok}} := 0.9 \cdot g_{\text{kok}} = 544.032 \cdot \text{kN}$$

Vaakakuormat

Tuuli:

yhdelle kerrokselle

$$F_h := 68.4\text{kN}$$

$$\frac{F_h}{h} = 19 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Lisävaakavoima /krs

$$F_l := 22\text{kN}$$

Kokonaisvaakavoima /krs:

$$H_d := 1.5 \cdot F_h + 1.15 \cdot F_l = 127.9 \cdot \text{kN}$$

Seinän mitat			
paksuus [m]	pituus [m]	korkeus [m]	kerrokorkeus [m]
0,24	16,4	46,8	3,6

krs	Leikkausvoima [kN]	Momentti [kNm]	Pystykuorma resultantti [kN]	Puristusjännitys σ_1 [MPa]	Taivutusvastus W [m ³]
13	127,90	230,22	547,78	0,1391	10,7584
12	255,80	920,88	1095,55	0,2783	10,7584
11	383,70	2071,98	1643,33	0,4175	10,7584
10	511,60	3683,52	2191,11	0,5567	10,7584
9	639,50	5755,50	2738,88	0,6957	10,7584
8	767,40	8287,92	3286,66	0,8350	10,7584
7	895,30	11280,78	3834,43	0,974	10,7584
6	1023,20	14734,08	4382,21	1,1134	10,7584
5	1151,10	18647,82	4929,98	1,2525	10,7584
4	1279,00	23022,00	5477,76	1,3917	10,7584
3	1406,90	27856,62	6025,54	1,5309	10,7584
2	1534,80	33151,68	6573,31	1,6701	10,7584
1	1662,70	38907,18	7121,09	1,8092	10,7584

krs	Vetojännitys taivutuksesta vedetyssä reunassa σ_2 [MPa]	Yhdistetty jännitys vedetyssä reunassa σ_3 [MPa]	Vetovyöhykkeen leveys [m]	Vetovoimaresultantti [kN]
13	0,02	-0,118	0,00	0
12	0,09	-0,193	0,00	0
11	0,19	-0,225	0,00	0,00
10	0,34	-0,214	0,00	0,00
9	0,53	-0,161	0,00	0,00
8	0,77	-0,065	0,00	0,00
7	1,05	0,074	0,58	5,19
6	1,37	0,256	1,53	47,15
5	1,73	0,481	2,27	131,23
4	2,14	0,748	2,87	257,42
3	2,59	1,058	3,35	425,72
2	3,08	1,411	3,76	636,14
1	3,62	1,807	4,10	888,67

krs	Yhdistetty jännitys puristetussa reunassa σ_4 [MPa]
13	0,16
12	0,36
11	0,61
10	0,90
9	1,23
8	1,61
7	2,02
6	2,48
5	2,99
4	3,53
3	4,12
2	4,75
1	5,43

Kitkatarkastelu				
ksr	Leikkausvoima [kN]	Puristus [kN]	Kitkavoima [kN] $\mu=0,5$	Kitkavoima [kN] $\mu=0,27$
13	127,9	544,032	272,016	146,9
12	255,8	1088,064	544,032	293,8
11	383,7	1632,096	816,048	440,7
10	511,6	2176,128	1088,064	587,6
9	639,5	2720,16	1360,08	734,4
8	767,4	3264,192	1632,096	881,3
7	895,3	3808,224	1904,112	1028,2
6	1023,2	4352,256	2176,128	1175,1
5	1151,1	4896,288	2448,144	1322,0
4	1279,0	5440,32	2720,16	1468,9
3	1406,9	5984,352	2992,176	1615,8
2	1534,8	6528,384	3264,192	1762,7
1	1662,7	7072,416	3536,208	1909,6

Normaalijännitys jakauma tasolla H1

Lasketaan elementtikohtaiset normaalivoimaresultantti käytetyssä kuormitusyhdistelmässä

Vedetyn reunan normaalijännitys $N_1 := 1.807227 \text{ MPa}$

Puristetun reunan normaalijännitys $N_2 := -5.425666 \text{ MPa}$

Jakauma on suoran muotoinen:

kulmakerroin $k := \frac{N_2 - N_1}{L_s - 0 \text{ m}}$

suoran yhtälö $y(x) := k \cdot x + N_1$

Vetovyöhykkeen leveys oli likimain sama kuin elementin leveys

Elementin V11 normaalivoima resultantti $\left(\int_{0 \text{ m}}^{4.1 \text{ m}} b \cdot y(x) \, dx \right) = 888.666 \cdot \text{kN}$

Elementin V12 normaalivoima resultantti $\left(\int_{4.1 \text{ m}}^{8.2 \text{ m}} b \cdot y(x) \, dx \right) = -890.626 \cdot \text{kN}$

Elementin V13 normaalivoima resultantti $\left(\int_{8.2 \text{ m}}^{12.3 \text{ m}} b \cdot y(x) \, dx \right) = -2.67 \times 10^3 \cdot \text{kN}$

Elementin V14 normaalivoima resultantti $\left(\int_{16.4 \text{ m}}^{12.3 \text{ m}} b \cdot y(x) \, dx \right) = 4.449 \times 10^3 \cdot \text{kN}$

Leikkausvoiman jakaantuminen seinän poikkileikkauksessa tasolla H1

Seinän pituus $L_s := 16.4\text{m}$

Seinän paksuus $b := 240\text{mm}$

Seinäelementin leveys $d := 4.1\text{m}$

Neliömomentti $I := \frac{b \cdot L_s^3}{12}$

Leikkausvoiman resultantti tasolla H1 $V_{h1} := 1662.7\text{kN}$

Käytetään jakauman laskemisessa Jourawskin leikkausjännityskaavaa $\tau(x) := V \cdot \frac{Q(x)}{I \cdot b}$

Staattinen momentti tarkastelukohdan alle jäävän poikkipinnan suhteen $Q(x) := b \cdot \left(\frac{L_s}{2} - x \right) \cdot 0.5 \cdot \left(\frac{L_s}{2} + x \right)$

Nyt jakauman yhtälöksi saadaan
$$\tau(x) := \frac{6 \cdot V_{h1} \cdot \left[\left(\frac{L_s}{2} \right)^2 - x^2 \right]}{b \cdot (L_s)^3}$$

Koska poikkileikkaus on symmetrinen, jakautuu leikkausvoimakin symmetrisesti. Reunoilla leikkausvoima on nolla ja keskellä maksimissaan.

Maksimi leikkausvoima $\tau(0\text{m}) \cdot b = 152.076 \frac{1}{\text{m}} \cdot \text{kN}$

Lasketaan sitten elementtikohtaiset leikkausvoimaresultantit. Riittää, että tarkastellaan elementtejä V11 ja V12, koska jakauma on symmetrinen. Elementtikohtaiset leikkausvoimaresultantit saadaan integroimalla $\tau(x)$ elementin yli.

Elementin V11 leikkausvoiman resultantti $b \cdot \int_d^{2d} \tau(x) dx = 259.797 \cdot \text{kN}$

Elementin V12 leikkausvoiman resultantti $b \cdot \int_0^d \tau(x) dx = 571.553 \cdot \text{kN}$

LIITE C: ELEMENTIN V13 LASKELMAT

Vaakasaumojen mitoitus leikkaukselle

Sauman leikkausvoima siirretään 32 mm vaarnatapeilla

Materiaaliominaisuudet:

Betonin ominaislujuudet (käytetään C35/45 betonin arvoja)	$f_{ck} := 35 \text{ MPa}$	$f_{ctk.0.05} := 2.25 \text{ MPa}$
	$\alpha_{cc} := 0.85$	$\gamma_c := 1.5$
Betonin mitoituslujuudet	$f_{cd} := \alpha_{cc} \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = 19.833 \cdot \text{MPa}$	
	$f_{ctd} := \frac{f_{ctk.0.05}}{\gamma_c} = 1.5 \cdot \text{MPa}$	
Teräksen myötölujuus	$f_{yk} := 500 \text{ MPa}$	
	$\gamma_s := 1.15$	
Teräksen mitoituslujuus	$f_{yd} := \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = 434.783 \cdot \text{MPa}$	

Vaarnatapin mitoitus:

Leikkausliitoksen osavarmuusluku	$\gamma_v := 1.25$
Vaarnatapin halkaisija	$\phi := 32 \text{ mm}$
Yhden vaarnatapin kestävyys	$V_{sd.Rd} := \frac{1.3}{\gamma_v} \phi^2 \sqrt{f_{yd} f_{cd}} = 98.893 \cdot \text{kN}$

Alempi sauma:

Alemmassa vaakasaumassa vaikuttava leikkausvoima	$V_{d1} := 770.6 \text{ kN}$
Vaadittu tappien määrä liitoksessa	$\frac{V_{d1}}{V_{sd.Rd}} = 7.792$
	$\Rightarrow 8 \text{ kpl}$

Huomioidaan kitka:

Liitoksessa vaikuttava puristava normaalivoima	$N_{d1} := 730.6 \text{ kN}$	
Liikekitkakerroin [RIL-115]	$\mu := 0.27$	
EC:n mukainen kitkakerroin	$\mu_1 := 0.5$	
Vaadittu tappien määrä liitoksessa	$\frac{V_{d1} - \mu \cdot N_{d1}}{V_{sd.Rd}} = 5.798$	$\frac{V_{d1} - \mu_1 \cdot N_{d1}}{V_{sd.Rd}} = 4.098$
	$\Rightarrow 6 \text{ kpl}$	$\Rightarrow 5 \text{ kpl}$

Ylempi sauma:

Ylemmässä saumassa voidaan käyttää betonin C40/50 lujuutta

$$f_{ck} := 40 \text{ MPa}$$

$$f_{cd} := \alpha_{cc} \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = 22.667 \cdot \text{MPa}$$

Yhden vaarnatapin kestävyys

$$V_{sd.Rd.1} := \frac{1.3}{\gamma_v} \phi^2 \sqrt{f_{yd} \cdot f_{cd}} = 105.721 \cdot \text{kN}$$

Ylemmässä vaakasaumassa
vaikuttava leikkausvoima

$$V_{d2} := 954.4 \text{ kN}$$

Vaadittu tappien määrä
ylemmässä liitoksessa

$$\frac{V_{d2}}{V_{sd.Rd.1}} = 9.027 \Rightarrow 10 \text{ kpl}$$

Huomioidaan kitka:

Liitoksessa vaikuttava
puristava normaalivoima

$$N_{d2} := 1304.4 \text{ kN}$$

Vaadittu tappien määrä
ylemmässä liitoksessa

$$\frac{V_{d2} - \mu \cdot N_{d2}}{V_{sd.Rd}} = 6.09 \quad \frac{V_{d2} - \mu_1 \cdot N_{d2}}{V_{sd.Rd}} = 3.056$$

$$\Rightarrow 7 \text{ kpl}$$

$$\Rightarrow 4 \text{ kpl}$$

Pystysaumojen mitoitus leikkaukselle

Sauman leikkausvoima siirretään vaarnatulla harjateräsenkiliitoksella

Betonin C40/50 vetolujuus

$$f_{ctk.0.05} := 2.46 \text{ MPa}$$

$$f_{ctd} := \frac{f_{ctk.0.05}}{\gamma_c} = 1.64 \cdot \text{MPa}$$

Kerroin c (EC)

$$c := 0.5$$

kerroin μ (EC)

$$\mu := 0.9$$

Pienennyskerroin (EC)

$$v := 0.6 \cdot \left(1 - \frac{f_{ck}}{250 \text{ MPa}} \right) = 0.504$$

Sauman normaalijännitystä ei huomioida

$$\sigma_n := 0 \text{ MPa}$$

Vasemman puolen pystysauma

Raudoituksen halkaisija

$$\phi := 8 \text{ mm}$$

Rauditusjako

$$s := 400 \text{ mm}$$

Leikkeiden määrä

$$n := 2$$

Vaaran leveys

$$b_v := 120\text{mm}$$

Teräspinta-ala

$$A_s := \frac{1}{s} \left(\frac{\phi}{2} \right)^2 \cdot \pi \cdot n = 201.062 \frac{1}{\text{m}} \cdot \text{mm}^2$$

$$A_i := b_v = 1.2 \times 10^5 \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$$

Liitoksen leikkauskestävyys

$$v_{Rdi} := \min \left(c \cdot f_{ctd} + \sigma_n \cdot \mu + \frac{A_s}{A_i} \cdot \mu \cdot f_{yd}, 0.5 \cdot v \cdot f_{cd} \right) = 1.476 \cdot \text{MPa}$$

$$V_{Rdi} := v_{Rdi} \cdot b_v = 177.076 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Mitoittava leikkausvoima vasemmassa pystysaumassa

$$V_{Ed} := 167.2 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Sauman käyttöaste

$$\frac{V_{Ed}}{V_{Rdi}} = 94.423\%$$

Vasemman puolen pystysauma

Raudoituksen halkaisija

$$\phi := 12\text{mm}$$

Raudoitusjako

$$s := 200\text{mm}$$

Leikkeiden määrä

$$n := 2$$

Vaaran leveys

$$b_v := 120\text{mm}$$

Teräspinta-ala

$$A_s := \frac{1}{s} \left(\frac{\phi}{2} \right)^2 \cdot \pi \cdot n = 1.131 \times 10^3 \frac{1}{\text{m}} \cdot \text{mm}^2$$

$$A_i := b_v = 1.2 \times 10^5 \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$$

Liitoksen leikkauskestävyys

$$v_{Rdi} := \min \left(c \cdot f_{ctd} + \sigma_n \cdot \mu + \frac{A_s}{A_i} \cdot \mu \cdot f_{yd}, 0.5 \cdot v \cdot f_{cd} \right) = 4.508 \cdot \text{MPa}$$

$$V_{Rdi} := v_{Rdi} \cdot b_v = 540.955 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Mitoittava leikkausvoima vasemmassa pystysaumassa

$$V_{Ed} := 538.9 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Sauman käyttöaste

$$\frac{V_{Ed}}{V_{Rdi}} = 99.62\%$$

Mitoitetaan vasemman puolen pystysauma uudelleen ottaen kitka huomioon

$$\sigma_n := \frac{76.76 \frac{\text{kN}}{\text{m}}}{b_v}$$

$$\phi := 12 \text{ mm}$$

$$s := 230 \text{ mm}$$

$$n := 2$$

$$b_v := 120 \text{ mm}$$

$$A_s := \frac{1}{s} \left(\frac{\phi}{2} \right)^2 \cdot \pi \cdot n = 983.455 \frac{1}{\text{m}} \cdot \text{mm}^2$$

$$A_i := b_v = 1.2 \times 10^5 \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$$

$$v_{Rdi} := \min \left(c \cdot f_{ctd} + \sigma_n \cdot \mu + \frac{A_s}{A_i} \cdot \mu \cdot f_{yd}, 0.5 \cdot v \cdot f_{cd} \right) = 4.603 \cdot \text{MPa}$$

$$V_{Rdi} := v_{Rdi} \cdot b_v = 552.314 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$


Mitoitava leikkausvoima vasemmassa pystysaumassa

$$V_{Ed} := 538.9 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

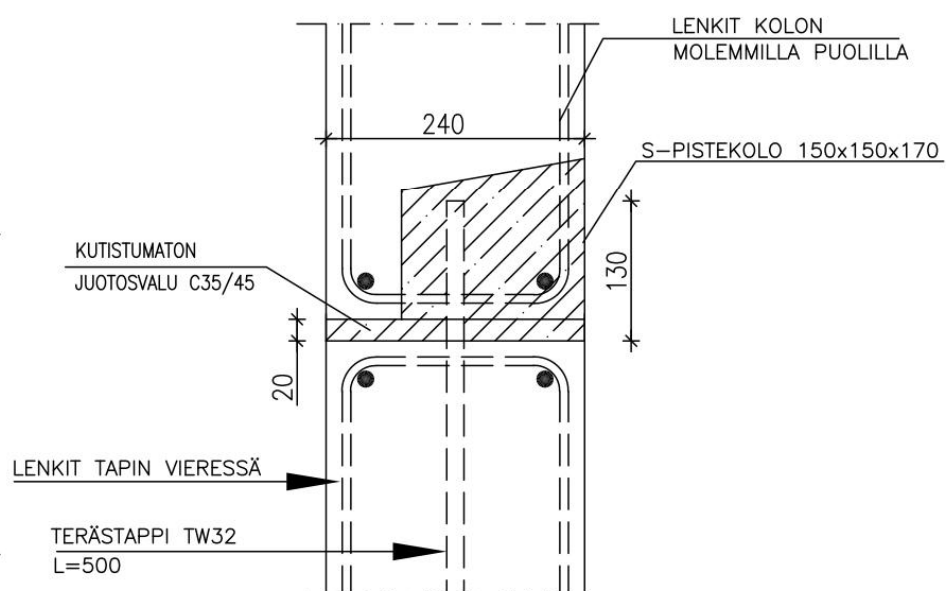
Sauman käyttöaste


$$\frac{V_{Ed}}{V_{Rdi}} = 97.571\%$$

LIITE D: SAUMOJEN LIITOSDETALJIT

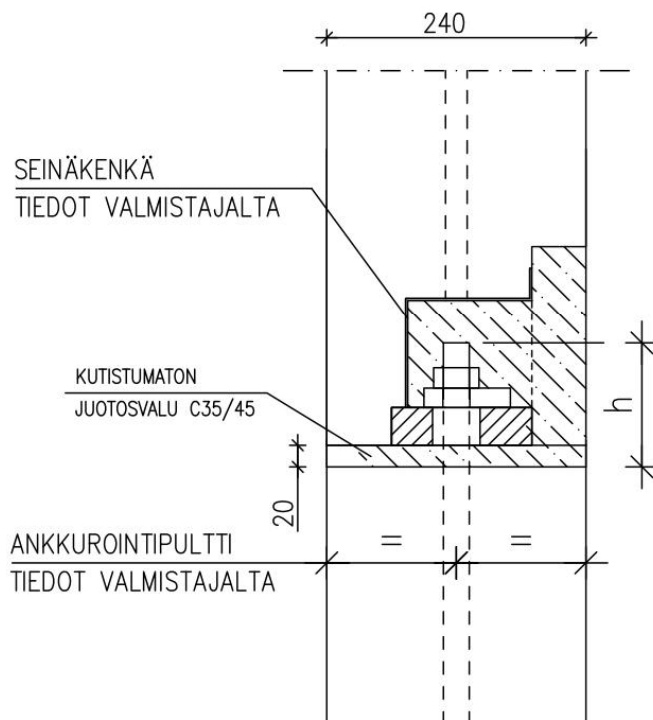
Suunnittelija 	Työn nro		DET.101
	Päiväys	Tekijä	
Rakennuskohde	Sisältö Väliseinän vaarnatappiliitos		


Mittakaava 1:5



Suunnittelija 	Työn nro		DET.102
	Päiväys	Tekijä	
Rakennuskohde	Sisältö Väliseinän pulttiliitos		

Mittakaava 1:5



Suunnittelija	Työn nro		DET.103
	Päiväys	Tekijä	
Rakennuskohde	Sisältö Väliseinäelementin pystysauma betonivaarnat + teräslenkit		

Mittakaava 1:5

JUOTOSVALU: C35/45

